

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**CONTROLE ESTATÍSTICO DAS COMPONENTES
DA INCERTEZA EM PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica**

Eng. Augusto Fernando Liska

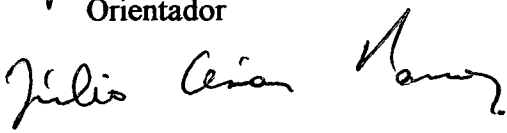
Florianópolis, Dezembro de 1999.

CONTROLE ESTATÍSTICO DAS COMPONENTES DA INCERTEZA EM PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Eng. Augusto Fernando Liska

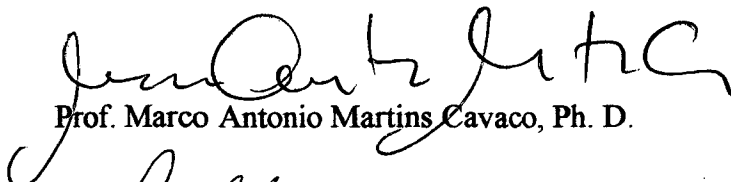
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica
área de concentração Metrologia e Instrumentação
e aprovada na sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.



Prof. Carlos Alberto Flesch, M. Eng.
Orientador


Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.


Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.


Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

A toda minha família,
em especial ao irmão
Rogério Liska.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Lucivane, por estar sempre a meu lado, com seu inestimável apoio e amor, ao longo dessa caminhada.

Ao professor Carlos Alberto Flesch, por ter atuado verdadeiramente como um orientador, estando sempre disposto a ajudar e sempre dando sugestões construtivas que fizeram desse trabalho uma dissertação de mestrado.

Ao LABMETRO e à Fundação CERTI, pelo apoio e estrutura concedidos para a concretização deste trabalho.

Às empresas que forneceram informações importantíssimas para a execução deste trabalho.

Ao colega de pós-graduação Gustavo Donatelli, por toda a ajuda espontânea no decorrer do trabalho, por ter sido um grande amigo e por vezes um “*hermano*”.

SUMÁRIO

1. – Introdução	01
1.1 – Considerações iniciais	01
1.2 – Objetivos do trabalho	06
1.3 – Estrutura do trabalho	07
 2. – Determinação da Incerteza de Medição	 10
2.1 - A situação atual do cálculo da incerteza de medição	10
2.1.1- A incerteza de medição na indústria	10
2.1.2- A incerteza de medição na Rede Brasileira de Calibração (RBC)	11
2.2- <i>Guia para Expressão da Incerteza de Medição</i>	12
2.2.1 – Histórico, conceituação e finalidade	12
2.2.2 – Definições específicas do <i>Guia</i>	13
2.2.3- Erro e incerteza	15
2.2.4 – Avaliação da incerteza padrão	15
2.2.5 – Incerteza padrão combinada	17
2.2.6 – Incerteza expandida	19
2.2.7 – Relatando a incerteza	22
2.3 – Metodologias práticas de cálculo da incerteza de medição	22
2.3.1 – Metodologia geral	22
2.3.2 – Metodologia simplificada (ISO/TR 14253-2)	24
2.4 - A aplicação do cálculo da incerteza combinada na indústria	25
2.4.1 – Cálculo da incerteza no laboratório de metrologia da indústria	26
2.4.2 – Cálculo da incerteza de medição no processo de fabricação	28
 3. – Análise da metodologia do PUMA (Procedimento para Gerenciamento da Incerteza)	 30

3.1 – O processo iterativo	31
3.2 – O processo de cálculo da incerteza	34
3.2.1 – Método de medição direta	34
3.2.2 – Método de medição indireta	35
3.3 – Facilidades em relação ao <i>Guia</i>	36
3.4 – Exemplo de utilização do PUMA	37
3.5 – Aplicação do PUMA na indústria	40
4. – Técnicas de Garantia da Qualidade Relacionadas com a Medição	42
4.1 – Controle estatístico de processo – CEP	42
4.1.1 – Coleta e organização de dados	42
4.1.2 – Cartas de controle	44
4.2 – Qualificação de instrumentos de medição	44
4.2.1 – Finalidade	45
4.2.2 – Características estatísticas dos resultados de medição	45
4.2.3 – Avaliação do instrumento de medição	46
4.3 – A garantia da qualidade e o cálculo da incerteza de medição	52
5. – Avaliação e Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição	54
5.1 – Considerações iniciais	54
5.2 – Determinação da aplicabilidade de um instrumento para o processo de manufatura	55
5.2.1 – A capacidade de captar as variações do processo	55
5.2.2 – A confiabilidade na prova de conformidade	56
5.3 – A garantia da obtenção de medições confiáveis através do PUMA	57
5.4 – Controle da incerteza expandida no chão de fábrica	59
5.4.1 – O controle estatístico aplicado à garantia da qualidade das medições	59
5.4.2 – Controle das componentes mais significativas da incerteza	60
5.4.3 – Determinação dos limites de tolerância	61
5.4.4 – Método de controle	63
5.4.5 – Frequência de amostragem	64

6. – Exemplo de Aplicação do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza	66
6.1 – Seleção do processo de medição adequado	66
6.1.1 – Aplicação do PUMA	67
6.2 – Parâmetros do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza	70
6.2.1 – Percentual de contribuição das componentes mais significativas	70
6.2.2 – Determinação dos limites de tolerância	71
6.2.3 – Considerações sobre as medições das grandezas de influência	74
6.2.4 – Frequência de amostragem	75
7. – Conclusões	77
7.1 – Aplicabilidade da metodologia	77
7.2 – Funcionalidade da metodologia	78
7.2.1 – Avaliação da etapa de seleção do processo de medição adequado	78
7.2.2 – Análise crítica da determinação dos parâmetros do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza	79
7.3 – Propostas para trabalhos futuros	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

Índice de Figuras

Figura 1 - Famílias de sistemas de medição e medidas materializadas usuais	2
Figura 2- Características metrológicas e operacionais comuns a quase todos os sistemas de medição	3
Figura 3 - Condições de contorno necessárias para fixação das características metrológicas e operacionais de um sistema de medição	4
Figura 4- Caracterização da tarefa de medição no controle	5
Figura 5 - Procedimento atual para cálculo da incerteza de medição na indústria	11
Figura 6 - Procedimento atual para cálculo da incerteza de medição na RBC	12
Figura 7 - Incerteza expandida de acordo com ISO/TR 14253-2	30
Figura 8- PUMA	33
Figura 9 – Exemplo de gráfico das medidas por operador	51
Figura 10 – Peça objeto do estudo	67
Figura 11 – A Incerteza Alvo em relação ao Intervalo de Tolerância	68

RESUMO

Nos processos metrológicos industriais o cálculo da incerteza de medição é um importante parâmetro para definir o nível de qualidade das medições. Neste trabalho é proposto o uso do controle estatístico das componentes mais significativas da incerteza de medição como forma de garantir medições confiáveis no decorrer do tempo.

Foram levantadas as atuais condições do cálculo da incerteza em indústrias e em laboratórios de metrologia. Constatou-se que o cálculo da incerteza de medição na indústria é principalmente utilizado para auxiliar a seleção de instrumentos de medição com o nível de qualidade adequado para seus processos de fabricação. Constatou-se também que a relação entre a incerteza de medição e a tolerância de fabricação é o parâmetro utilizado para selecionar o processo de medição mais adequado ao controle geométrico de um processo de fabricação.

Foram analisados os procedimentos de cálculo de incerteza, baseados no *Guia para Expressão da Incerteza de Medição*, visando sua aplicação aos processos de controle geométrico. Essa análise resultou na indicação de um procedimento considerado o mais adequado para execução do cálculo da incerteza dos processos de medição no chão de fábrica. O procedimento recomendado é o *Procedimento para Gerenciamento da Incerteza de Medição*. A recomendação desse último procedimento é baseada na sua facilidade de execução e na adequação aos diversos níveis de incerteza exigidos para diferentes processos metrológicos no chão de fábrica.

O estudo da incerteza de medição em processo de controle geométrico mostrou que a mesma é fortemente influenciada por um número reduzido de fatores. Neste trabalho é defendida a premissa de que controlando os fatores significativos da incerteza de medição, para que os mesmos se mantenham dentro dos níveis preestabelecidos, a qualidade das medições também estará sob controle. A metodologia propõe que alguns conceitos de controle estatístico sejam aplicados a esses fatores. Garantindo que esses fatores, ao longo do tempo, não extrapolem limite prefixados, garantem-se medições confiáveis no chão de fábrica.

ABSTRACT

In industrial metrology processes the evaluation of the uncertainty measurement is an important parameter to define the measurements' quality level. This study intends to use the statistical control in the most significant components of the uncertainty measurement as form to guarantee reliable measurements.

Current conditions of uncertainty evaluation were analyzed in industries and in metrology laboratories. It was verified that the evaluation of the uncertainty measurement in the industry is used mainly to guide the selection of measurement instruments with the appropriate quality level for their production processes. It was also verified that the relationship between uncertainty measurement and production tolerance is the parameter used to select the more appropriate measurement process to the geometric control of a production process.

The procedures of uncertainty evaluation were analyzed, based on the Guide for Expression of the Uncertainty of Measurement, seeking application to the processes of geometric control. That analysis resulted in the indication of a procedure considered the most appropriate for execution the calculation of uncertainty measurement processes in the shop floor. The procedure recommended is the Procedure for Administration of the Uncertainty of Measurement. The recommendation of that is based on execution easiness and in the adaptation to several uncertainty levels demanded for different process metrology in the shop floor.

The study of uncertainty measurement in process of geometric control showed that it is influenced strongly by a reduced number of factors. In this study is defended the premise that controlling the significant factors of the uncertainty measurement, in order to keep it inside of the preset levels, the quality of the measurements will also be under control. The methodology proposes that some concepts of statistical control can be applied to those factors. Guaranteeing that those factors, along the time, don't extrapolate limit preset, it guarantees reliable measurements in the shop floor.

1. – Introdução

1.1 – Considerações iniciais

A busca de incremento de qualidade e produtividade na produção da indústria mecânica torna-se uma tarefa cada vez mais árdua, nos dias atuais. Os processos produtivos foram sendo otimizados ao longo dos anos e, atualmente, conseguir-se um pequeno incremento de produtividade com qualidade é uma tarefa que requer muita pesquisa e empenho.

A qualidade do processo produtivo não é uma característica fácil de ser avaliada, principalmente quando se fala de processos de manufatura que exigem controle geométrico na verificação de conformidade. Todo processo de controle geométrico é baseado em dados de medições das características geométricas que são objetos do controle.

Um processo de medição necessita da definição do que medir, de como medir e de que instrumento de medição será utilizado. O estabelecimento de um processo de medição precisa levar em consideração os requisitos da aplicação e as disponibilidades de mercado existentes para executar a medição em questão.

Como as disponibilidades do mercado de instrumentos de medição para controle geométrico são bastante amplas - Figura 1 - a tarefa de definir o processo de medição aparenta ser fácil. No entanto a realidade é bem diferente, pois a correta definição do processo de medição mais adequado para o controle geométrico desejado depende de muitos fatores, tais como: o tipo de grandeza a ser medida, a incerteza de medição

admissível para o processo e a responsabilidade do processo de medição frente ao processo produtivo.

Filosofia Cont.		Denominação usual das		Ordem de grandeza
Qualidade		"famílias"		incerteza [µm]
S I S T E M A S D E M E D I Ç Ã O	Atributo e por Variável	01 - Escalas		1 a 1000
		02 - Paquímetros		40 a 100
		03 - Micrômetros		2 a 10
		04 - Medidor de Deslocamentomento	- uso geral - de aplicação dedicada	0,1 a 100
		05 - Med. dedicados	- de bloco padrão - de ângulo - de rugosidade - de engrenagem - de erro de forma	
			- circularidade - contorno	
		06 - Transferidores		0,5 a 30
		07 - Níveis	- óticas	
		08 - Máq. de medir	- projetor de perfil - microscópio de	
			- vertical - horizontal	
		09 - Máq. de medir Dedicadas	- eixo único - três eixos	0,7 a 70
		10 - Máq. de medir Por coordenadas	- engrenagem - divisórias	
		11 - Calibradores		
	Atributos	MEDIDAS MATERIALIZADAS		

Figura 1 - Famílias de sistemas de medição e medidas materializadas usuais

A avaliação conjunta dos fatores citados no parágrafo anterior leva à determinação do processo de medição mais adequado para o controle geométrico. O primeiro passo para essa avaliação conjunta é a definição das caraterísticas operacionais que o sistema de medição deve possuir.

A correta e melhor utilização de um sistema de medição requer o conhecimento de suas características metrológicas e operacionais, as quais podem ser classificadas conforme a Figura 2. Algumas características operacionais dos instrumentos de medição podem ser geralmente encontradas em catálogos dos próprios fabricantes. Para

a grande maioria dos instrumentos de controle geométrico os fabricantes fornecem, em seus catálogos, as faixas nominais e os valores correspondentes a uma divisão de escala ou dos incrementos digitais.

	Características		Forma de Apresentação
METROLOGIA	Comportamento do SM		tabela
	- característico de resposta	⇒	equação
	- curva de erros		gráfico
	Tendência	⇒	valor absoluto
	Dispersão	⇒	valor relativo
	Erro máximo		- faixa de medição
	Histerese		- ao valor final da escala
	Incerteza		- ao valor de referência
OPERACIONAL	Faixa de medição especificada	⇒	valor absoluto
	Faixa Nominal		máximo e mínimo
	Resolução		
	Valor de uma divisão	⇒	valor absoluto
	Sensibilidade		

Figura 2- Caraterísticas metrológicas e operacionais comuns a quase todos os sistemas de medição

As características metrológicas dificilmente são detalhadas nos catálogos de instrumentos de medição, em especial naqueles empregados em controle geométrico no chão de fábrica. Há casos em que os fabricantes informam o **erro máximo do instrumento de medição**. Existem, também, casos em que essas características estão referenciadas a normas. Os relatórios de calibração dos instrumentos de medição geralmente são a melhor fonte de informação no que diz respeito a características metrológicas.

As características metrológicas e operacionais estão referenciadas a determinadas condições. Essas condições, que em geral são parâmetros geométricos, método de medição e condições ambientais, podem atuar em conjunto ou separadamente, como mostra a Figura 3. Além disso, as características metrológicas são variáveis ao longo

do tempo. Para isso contribuem fatores tais como: condições ambientais, de armazenamento e de utilização, e aspectos construtivos do sistema de medição.

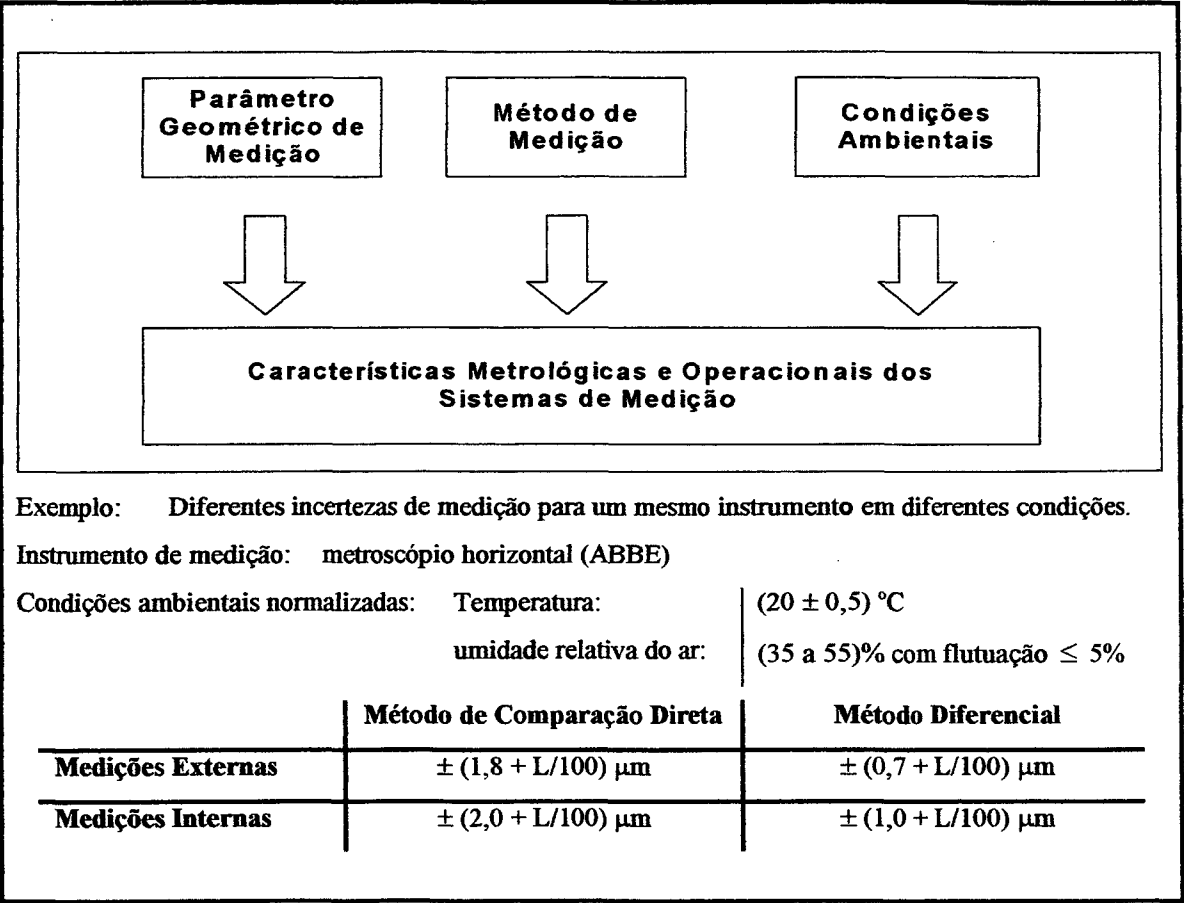


Figura 3 - Condições de contorno necessárias para fixação das características metrológicas e operacionais de um sistema de medição

A seleção de instrumentos de controle geométrico depende da caracterização da tarefa de medição e geralmente obedece aos critérios da Figura 4 [França93]. A caracterização da tarefa de medição consiste em definir: tipo de parâmetro a medir, faixa de medição, incerteza de medição e método de medição.

Em um processo de seleção de instrumentos de medição para controle geométrico é necessário definir a grandeza a medir [França93]. Para que a definição da grandeza a medir seja considerada completa deve ser especificada a tolerância de fabricação. Tolerância de fabricação é a faixa de valores que a característica geométrica pode apresentar em relação ao valor ótimo estabelecido em projeto, sem comprometer a função da peça.

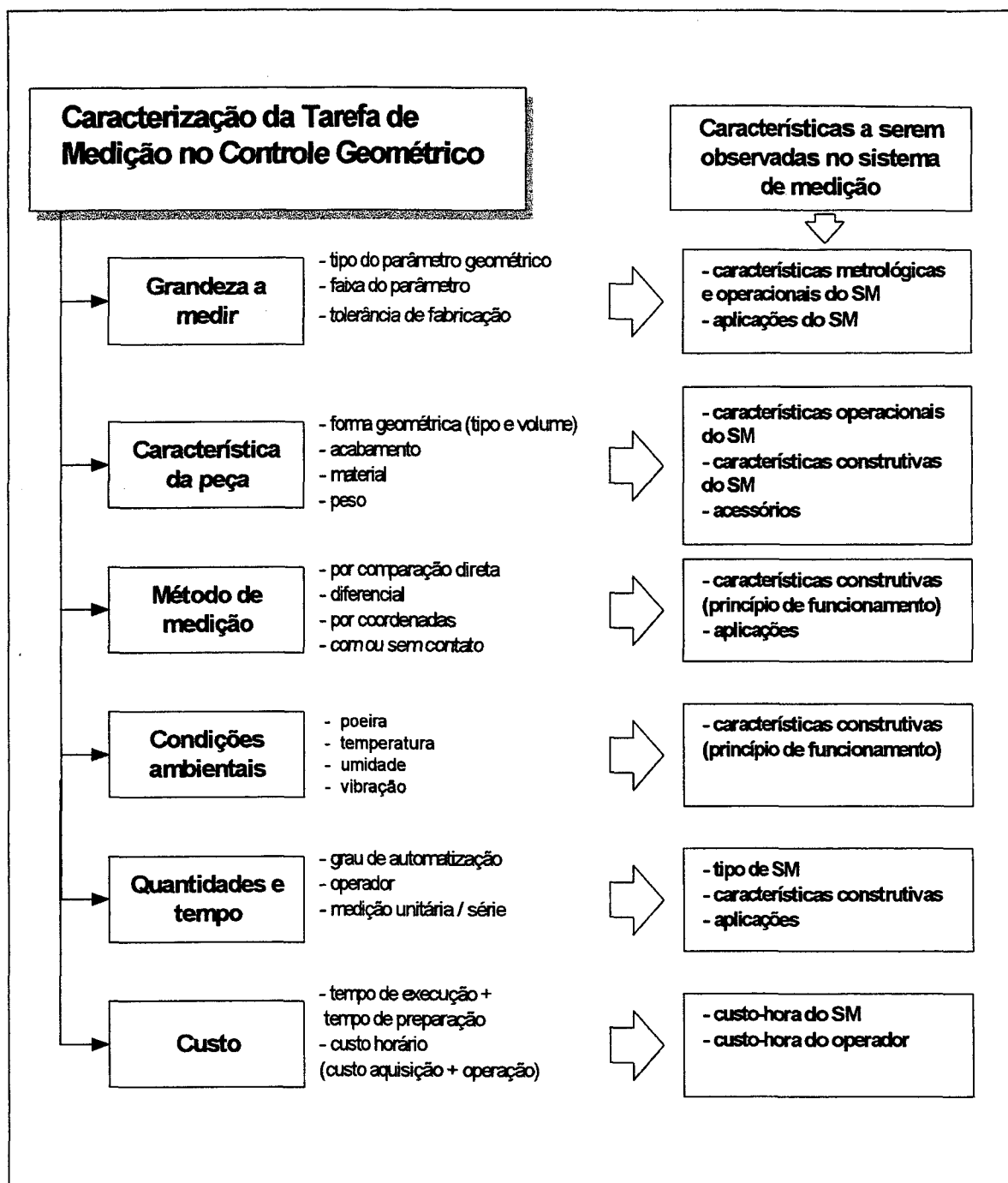


Figura 4- Caracterização da tarefa de medição no controle geométrico - sistema de seleção de instrumentos de medição [França93]

Os limites inferior e superior da faixa de valores estabelece o Intervalo de Tolerância (IT). Os sistemas de seleção de instrumentos de medição geralmente utilizam o valor do IT para compará-lo com o valor da incerteza do sistema de medição (ISM). Essa comparação é realizada com o objetivo de verificar se a razão entre incerteza e tolerância satisfaz à seguinte inequação:

$$\boxed{ISM \leq \frac{IT}{W}}$$

Inequação 1 – Critério de Seleção de Instrumentos de Medição

onde: **W** = valor numérico (geralmente de 3,5 a 10) definido com base em particularidades da interação entre instrumento de medição e processo de fabricação.

Pode-se concluir que a razão **ISM/IT** é um dos critérios mais importantes para o processo de seleção de instrumentos de controle geométrico. Pode-se, ainda, dizer que o cálculo da incerteza de medição transcende a função de avaliar a confiabilidade do resultado de medição, pois é fator importantíssimo na seleção do instrumento que irá executar a função de controlar o processo de fabricação.

Atualmente, na indústria [MENNO97, EMBRACO97], quando procura-se estabelecer uma relação entre o intervalo de tolerância e a incerteza de medição geralmente se utiliza o valor da **ISM** (incerteza do sistema de medição) obtido da calibração do instrumento de medição. Este trabalho considera que esse procedimento não cumpre a finalidade de selecionar o instrumento de medição para um processo de manufatura. Isso deve-se ao fato de que o valor da incerteza de medição obtido na calibração do instrumento de medição não está relacionada com as condições reais de uso do mesmo.

Portanto, para garantir que um sistema de seleção de instrumentos para controle geométrico seja coerente quando da utilização da relação entre incerteza de medição e intervalo de tolerância como critério de seleção, deve-se procurar estabelecer o valor da incerteza do processo de medição levando em consideração as condições reais de uso; ou seja: as condições do processo de manufatura que será alvo do controle geométrico. Dessa forma fica evidente a necessidade de se calcular a incerteza dos resultados de medição na condição de real utilização do processo de medição, ou seja, no chão de fábrica.

1.2 – Objetivos do trabalho

É evidente a importância do controle geométrico para obtenção de produtos manufaturados dentro de padrões de qualidade exigidos pelo mercado atual. A eficiência

do controle geométrico depende da qualidade do processo de medição; esse por sua vez é diretamente influenciado pela incerteza de medição. É necessário calcular-se a incerteza de medição levando-se em consideração as condições reais do processo de medição, ou seja, calcular a **Incerteza do Processo de Medição**. Neste trabalho são analisadas as diversas formas usuais de se calcular a incerteza de medição. Através dessa análise é definida uma metodologia de cálculo de incerteza proposta como a mais adequada para determinar a Incerteza do Processo de Medição.

Adicionalmente, para se garantir que um processo de medição tenha qualidade satisfatória deve-se garantir que a incerteza do processo medição mantenha-se dentro de níveis condizentes com os requisitos do processo de manufatura. Neste trabalho está proposta uma metodologia para monitorar a magnitude da Incerteza do Processo de Medição.

1.3 – Estrutura do trabalho

A análise da Incerteza de Medição começa pelo levantamento da situação atual dos métodos de cálculo utilizados na indústria e na Rede Brasileira de Calibração. É mostrada somente uma visão geral do que acontece atualmente na indústria e nos laboratórios de calibração.

O estudo sobre incerteza de medição foi baseado principalmente no *Guia para Expressão da Incerteza de Medição* [BIPM93]. Esse documento, atualmente, serve de base para as definições sobre cálculo de incerteza de medição em todos os níveis de utilização, ou seja, desde o chão de fábrica até o laboratório primário de calibração. A metodologia proposta por esse guia foi comparada com o cálculo da incerteza na indústria e foi avaliada sob dois aspectos: a incerteza de medição voltada para o laboratório de metrologia da indústria; e a incerteza de medição voltada para o processo de fabricação. Dentro dessa análise procurou-se definir qual o procedimento mais adequado para o uso no chão de fábrica, visando atender as necessidades da indústria no que diz respeito à praticidade, agilidade e economia.

Este trabalho apresenta em maiores detalhes a metodologia escolhida como a mais adequada para o cálculo da incerteza do processo de medição. A metodologia é confrontada com o *Guia para Expressão da Incerteza de Medição*. É mostrado um exemplo de aplicação da metodologia e fundamenta-se a aplicação da mesma na indústria.

Como toda a motivação do trabalho está relacionada com a qualidade, foram estudadas as técnicas de garantia da qualidade relacionadas com a medição. Este trabalho faz um rápido apanhado sobre Controle Estatístico de Processo (CEP) e sobre qualificação de instrumentos de medição baseado na norma QS9000 [For95]. Com base nessas metodologias de garantia da qualidade baseadas em medições, é analisada a relação entre a garantia da qualidade e a incerteza de medição.

Com base em todo estudo sobre incerteza de medição e sobre garantia da qualidade relatado nos quatro primeiros capítulos, este trabalho propõe a metodologia de **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição**. Inicia-se com a definição da aplicabilidade de um instrumento de medição para um determinado processo de manufatura. Esse procedimento é baseado na QS9000. Avalia-se a garantia de medições confiáveis utilizando-se o *Procedimento para Gerenciamento da Incerteza de Medição*.

A metodologia do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** é explanada baseando-se no controle estatístico das componentes mais significativas da incerteza, através da determinação de limites de controle para as referidas componentes. Definem-se também diretrizes para a escolha do método de controle das componentes e para a determinação da frequência de amostragem das mesmas.

Para elucidar a aplicação do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição**, é mostrado um breve exemplo de utilização do mesmo, passando-se pela seleção do processo de medição mais adequado até a definição dos parâmetros que servirão de base para a aplicação da metodologia.

As conclusões sobre o trabalho avaliam a aplicabilidade e a funcionalidade da metodologia proposta. A avaliação da funcionalidade divide-se em duas partes: a seleção do processo de medição adequado; e a determinação dos parâmetros do controle estatístico. Com base em uma análise crítica do trabalho são feitas propostas e sugestões para seu aprimoramento por meio de trabalhos futuros.

2. – Determinação da Incerteza de Medição

2.1 - A situação atual do cálculo da incerteza de medição

2.1.1 - A incerteza de medição na indústria

Atualmente, nas indústrias de fabricação mecânica, inclusive nas certificadas pela ISO 9000, o cálculo de incerteza de medição - quando executado - ocorre na calibração de instrumentos de medição.

As siglas e as equações apresentadas na Figura 5 e na Figura 6 não estão obrigatoriamente baseadas nos mesmos conceitos, mesmo possuindo nomes e siglas semelhantes. Essas siglas não foram normalizadas porque figuram neste trabalho somente como exemplo do que utiliza-se na indústria e na RBC. As siglas adotadas pelo *Guia*, as quais serão abordadas no próximo item, não possuem relação com as simbologias apresentadas até o momento.

Como exemplo da sequência de cálculo utilizado pelas indústrias pode-se apresentar as equações da Figura 5. Cabe salientar que as equações apresentadas são as utilizadas em uma das indústrias [MENNO97] pesquisadas, servindo apenas de exemplo. No entanto, a linha de pensamento em relação ao cálculo da incerteza de medição pode ser considerada como demonstrativa da realidade atual.

Esse procedimento de cálculo é utilizado para determinar o Erro Máximo de medição. O maior valor encontrado é tomado como sendo a *Incerteza do Sistema de*

Medição (ISM). Esse valor é geralmente confrontado com especificações de fabricantes ou com normas referentes ao instrumento de medição, para avaliar a conformidade do mesmo.

$ISM = \pm (ES _{\max} + DSM)$ $ES = VVC - \bar{x}$ $DSM = \pm t.s$ $S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$ $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	<p>ISM: Incerteza do sistema de medição;</p> <p>ES: Erro Sistemático (para cada ponto da faixa de medição);</p> <p>DSM: Dispersão do sistema de medição;</p> <p>VVC: Valor Verdadeiro Convencional;</p> <p>\bar{x} : Média das Medidas (em cada ponto da faixa de medição);</p> <p>t: Fator de Student, para 95%;</p> <p>S: Desvio Padrão das Medidas.</p>
---	---

Figura 5 - Procedimento atual para cálculo da incerteza de medição na indústria

O valor da *Incerteza do Sistema de Medição* é utilizado para avaliar se o instrumento tem ou não condições de realizar determinada medição com o nível de exatidão exigido. Como exemplo, pode-se citar que, em uma das indústrias pesquisadas, para um sistema de medição estar apto para executar uma medição, a incerteza do mesmo deve ser menor ou igual a um décimo da faixa de tolerância [EMBRACO97]. Dessa forma a empresa acredita que pode minimizar a interferência referente às incertezas do instrumento de medição no processo de decisão da conformidade do produto.

2.1.2 - A incerteza de medição na Rede Brasileira de Calibração

A Rede Brasileira de Calibração (RBC), até meados de 1996, avaliava a incerteza de medição com base nos cálculos apresentados abaixo, Figura 6. Assim como no item 1.1.1, as equações aqui apresentadas são as utilizadas em um dos laboratórios da RBC (Rede Brasileira de Calibração) [CMCQ97] pesquisado, servindo apenas de exemplo.

Quando foi feito o levantamento de informações (1997/1998) a RBC estava em fase de transição, passando do método apresentado acima para o método recomendado pelo *Guia para Expressão da Incerteza de Medição* [BIPM93]¹. Com base nas visitas realizadas a alguns laboratórios da rede [CERTI97], no período de janeiro a março de 1997, apurou-se que naquela época aproximadamente (30 a 40) % dos procedimentos de cálculo da incerteza de medição estavam sendo executados de acordo com o método recomendado pelo *Guia*. Atualmente, por exigências do INMETRO, os laboratórios da RBC têm a totalidade de seus procedimentos de cálculo da incerteza de medição de acordo com o *Guia*.

$E_{\text{máx}} = I_{\text{SM}} = \pm Td + Re _{\text{máx na faixa de medição}}$ <p>Onde:</p> <p>$E_{\text{máx}}$ = Erro máximo;</p> <p>I_{SM} = Incerteza do sistema de medição;</p> <p>Td = Tendência (Valor Verdadeiro Convencional – Média das indicações);</p> <p>Re = Repetitividade (fator de Student multiplicado pelo desvio padrão das leituras).</p> <p>$Td_i = VVC - M_i$ $Re = \pm t.s$</p>

Figura 6 - Procedimento atual para cálculo da incerteza de medição na RBC

2.2 - O *Guia para Expressão da Incerteza de Medição*

2.2.1 - Histórico, conceituação e finalidade

Com o objetivo de desenvolver um procedimento, internacionalmente aceito, para expressar a Incerteza de Medição (IM), o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) convocou um grupo de trabalho que desenvolveu a Recomendação INC-1 (1980), Expressão de Incertezas Experimentais [BIPM93].

¹ Neste documento, a palavra *Guia* será utilizada para referenciar o *Guia para Expressão de Incerteza de medição*.

A tarefa de desenvolver um *Guia* detalhado foi transferida para a Organização Internacional de Normalização (ISO), que confiou a responsabilidade ao ISO *Technical Advisory Group on Metrology* (TAG 4), que por sua vez estabeleceu o Grupo de Trabalho 3 (ISO/TAG 4/WG 3). Esse Grupo de Trabalho estabeleceu o seguinte termo de referência:

“Desenvolver um documento-*Guia* baseado na recomendação do Grupo de Trabalho do BIPM sobre a Declaração de Incertezas que forneça regras sobre a expressão da incerteza de medição para a utilização em normalização, calibração, credenciamento de laboratórios e serviços de metrologia.”²

O *Guia* estabelece regras para que as medições e especificações metroológicas realizadas em diversas partes do mundo possam ser facilmente comparadas. Para tal, o *Guia* faz com que a incerteza de medição seja calculada e expressa de uma maneira padronizada, para que a interpretação da mesma também possa ser padronizada [Mathiesen97]. O método ideal para expressar a IM (Incerteza de Medição) deve ser aplicável a todas as espécies de medições em todos os níveis de exatidão [BIPM93].

2.2.2 - Definições específicas do *Guia*

O termo “Incerteza de Medição”, significa dúvida acerca da validade de um Resultado de Medição (RM). De acordo com o *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia* (abreviado para VIM) [INMETRO95] o termo Incerteza de Medição é conceituado da seguinte forma:

incerteza (de medição)

“Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos ao mensurando.”³

² BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International for Standardization, Geneva, Switzerland, First edition, 1993.

³ VIM, definição 3.19.

Em geral, o **RM** (Resultado de Medição) é somente uma aproximação ou estimativa do valor de uma quantidade específica que pode ser medida, ou seja, o mensurando. Esse resultado somente está completo quando estiver acompanhado de uma declaração quantitativa de sua incerteza.

A incerteza do **RM** geralmente possui várias componentes, que podem ser agrupadas em duas categorias, de acordo com o método usado para estimar seus valores numéricos:

Método de Avaliação Tipo A: método de avaliação da incerteza baseado numa análise estatística de uma série de observações;

Método de Avaliação Tipo B: método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações.

Em ambos os métodos de avaliação os componentes de incerteza podem ser caracterizados por desvios padrão. De acordo com o *Guia*, quando se tem a incerteza de um resultado de medição expressa como um desvio padrão pode-se chamá-la de **incerteza padrão**.

Quando se combinam os dois tipos de **IM** (A e B) obtém-se a **incerteza padrão combinada**, que é uma estimativa do desvio padrão que caracteriza a dispersão de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Essa definição vai ao encontro da definição de incerteza de medição do **VIM** (ver nota 3).

Multiplicando a incerteza padrão combinada por um fator de abrangência obtém-se a **incerteza expandida**, que é um intervalo em torno do **RM** com o qual tem-se uma fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, associada a um percentual de nível da confiança. O nível da confiança é determinado pelo valor do fator de abrangência⁴ utilizado para obter-se a incerteza expandida.

⁴ Definições detalhadas de fator de abrangência e de nível da confiança serão abordadas no item 2.2.6.

2.2.3 - Erro e incerteza

A incerteza do resultado de uma medição não deve ser confundida com o erro. A confusão entre erro e incerteza é muito comum, no entanto erro e incerteza não representam o mesmo conceito e possuem princípios diferentes. As principais diferenças entre ambos são demonstradas na Tabela 1, a qual foi adaptada da referência [Kornblit97]. Cabe salientar que a comparação, da forma como está apresentada, somente é válida quando mais de uma medição é feita para estimar o valor do mensurando.

“O exato erro de um resultado de medição é desconhecido e incalculável.”⁵

Tabela 1 – Diferenças entre erro e incerteza [Kornblit97]

Erro	Incerteza
Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando	Indicada quantitativamente em função da dispersão de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando
Correção pode ser feita	Correção não pode ser feita
Estimado de um valor médio da medições	A sua estimativa não depende do valor médio das medições e sim do desvio padrão das medições

2.2.4 - Avaliação da incerteza padrão

a) Avaliação tipo A da incerteza padrão

Geralmente a melhor estimativa de uma grandeza que varia aleatoriamente é a média aritmética (\bar{q}) de n observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Equação 1 – Média aritmética

⁵ BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International for Standardization , Geneva, Switzerland, First edition, 1993.

Observações individuais diferem em valor, por causa das variações aleatórias. A variância s^2 da distribuição de probabilidade de q é dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad \text{Equação 2 – Variância}$$

A dispersão dos valores, q_k observados, em torno de sua média \bar{q} , é dada pelo desvio padrão. A melhor estimativa da variância da média da população, a qual pertence a amostra q , é: $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$. A variância da média (\bar{q}) de uma amostra dessa população é dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad \text{Equação 3 – Variância da média de uma amostra}$$

A variância da média $s^2(\bar{q})$ e o desvio padrão da média $s(\bar{q})$, que é igual à raiz quadrada positiva de $s^2(\bar{q})$, pode ser usada como parte da incerteza de \bar{q} . Portanto:

$u^2(x_i) = s^2(X_i)$ - variância do obtida pelo método tipo A;

$u(x_i) = s(X_i)$ - incerteza padrão obtida pelo método tipo A.

O número de observações n deve ser suficientemente grande para que $s^2(\bar{q})$ forneça uma estimativa confiável da variância $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ [BIPM93]. Os graus de liberdade v_i sempre devem ser informados quando avaliações Tipo A dos componentes de incerteza são documentados.

b) Avaliação tipo B da incerteza padrão

Para o caso de que a estimativa de uma grandeza não seja obtida através de observações repetidas, a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseando-se em informações, provindas de quaisquer fontes, sobre a variabilidade da referida grandeza [BIPM93].

Geralmente, em diversas fontes de consulta [BIPM93, NAMAS95], encontra-se a incerteza declarada como sendo um múltiplo de um desvio padrão, ou como

um intervalo que tem um nível de confiança declarado. Para o primeiro caso a incerteza padrão é o valor da “fonte” dividido pelo multiplicador indicado. No segundo caso, quando não existir indicação contrária, pode-se supor uma distribuição normal, e calcular a incerteza padrão, dividindo-se o valor da “fonte” por um fator correspondente ao nível da confiança informado.

Quando não houver conhecimento suficiente para que se possa afirmar que determinado valor está relacionado a uma determinada distribuição de probabilidade, ou se somente podemos dizer que o referido valor encontra-se em determinado intervalo (limites superior e inferior), pode-se assumir distribuições de probabilidade (de maneira conservadora) para esses valores. As distribuições geralmente utilizadas nestes casos são retangulares, triangulares e trapezoidais [BIPM93]. Se um componente de incerteza determinado dessa forma contribuir significativamente para a incerteza do resultado de medição, é prudente que se obtenham dados adicionais para sua avaliação mais completa [BIPM93].

2.2.5 - Incerteza padrão combinada

O mensurando Y (*grandeza de saída*) é determinado com base em um certo número de *grandezas de entrada* (X_i), de acordo com uma particular função (Equação 4):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 4 – Mensurando}$$

A função f representa o procedimento de medição e o método de cálculo usado para obter Y . Geralmente f só pode ser determinada experimentalmente. Portanto, para se obter a relação entre grandezas de entrada X_i e a grandeza de saída Y , transforma-se a função em uma relação de estimativas.

A estimativa de saída é representada por y , sendo obtida da Equação 4, usando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad \text{Equação 5 – Estimativa do mensurando}$$

O desvio padrão da estimativa de saída “y” é a **incerteza padrão combinada** (u_c), que é determinada baseando-se nos desvios padrão de cada uma das estimativas das grandezas de entrada “ x_i ”.

a) Grandezas de entrada não correlacionadas

Após as incertezas padrão $u(x_i)$ das estimativas de entrada x_i terem sido avaliadas, na forma de componentes tipo A e tipo B, se as grandezas de entrada não possuem correlação, a u_c (incerteza padrão combinada) pode ser calculada da seguinte forma [BIPM93]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad \text{Equação 6 – Incerteza padrão combinada}$$

Onde c_i é o *coeficiente de sensibilidade* associado com a estimativa de entrada x_i . O Coeficiente de sensibilidade descreve como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Para calcular o coeficiente de sensibilidade c_i pode-se usar a função f, ver **Equação 7**, ou determiná-la experimentalmente, isto é: mede-se a variação em y causada por uma variação em um dado X_i enquanto se mantém constantes as grandezas de entrada restantes.

$$c_i = \frac{\delta f}{\delta x_i} \quad \text{Equação 7 – Coeficiente de sensibilidade}$$

b) Grandezas de entrada correlacionadas

Se alguns dos X_i são significativamente correlacionados, as correlações devem ser levadas em consideração. A expressão apropriada para a variância combinada é [BIPM93]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)$$

Equação 8 - Incerteza padrão combinada para grandezas correlacionadas

O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo *coeficiente de correlação* (r) estimado [BIPM93].

$$\frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} = r(x_i, x_j) \quad \text{Equação 9 – Coeficiente de correlação}$$

Caso existam grandezas de entrada correlacionadas e obtidas através de avaliações por meios estatísticos (componentes tipo A), pode-se calcular a covariância dos mesmos através da seguinte equação [BIPM93]:

$$s(\bar{q}, \bar{r}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})(r_k - \bar{r}) \quad \text{Equação 10 – Covariância para grandezas correlacionadas}$$

Sendo: \bar{q} = média aritmética da grandeza de entrada x_i ;

\bar{r} = média aritmética da grandeza de entrada x_j .

2.2.6 - Incerteza expandida

Nas diversas aplicações, desde o campo científico até o industrial, é necessário dar uma medida de incerteza que defina um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores, que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando. Essa medida “adicional” de incerteza é denominada **Incerteza Expandida**.

A incerteza expandida U é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um *fator de abrangência* k [BIPM93].

$$U = k u_c(y) \quad \text{Equação 11 – Incerteza expandida}$$

A incerteza expandida U é interpretada com definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração p da distribuição de probabilidade, onde p é o “*nível da confiança*” do intervalo (definição do *Guia* - item 6.2.2). Para números de graus de liberdade significativamente grandes o fator de abrangência usado é 2, que propicia um nível da confiança de aproximadamente 95%.

Para obter o valor do fator de abrangência k_p , que produz um intervalo correspondente a um específico nível da confiança p , é necessário o conhecimento detalhado da distribuição de probabilidade que caracteriza o resultado da medição e sua incerteza combinada.

Na prática os parâmetros que caracterizam a distribuição de probabilidade das quantidades de entrada são geralmente estimadas. Além disso, na maioria dos casos de cálculos de incerteza, tem-se dois tipos de distribuição de probabilidade predominantes, que são:

- a) distribuição normal, onde o intervalo compreendido entre a média menos a média mais um desvio padrão corresponde a aproximadamente 68% da amostra;
- b) distribuição retangular, onde o intervalo compreendido entre a média menos a média mais um desvio padrão corresponde a aproximadamente 57% da amostra.

O pequeno ganho em confiabilidade advindo do ganho de distribuições mais elaboradas geralmente não justifica a dificuldade operacional inerente [FLESC95]. O *Guia*, utilizando o *Teorema do Limite Central*, assume que a incerteza padrão combinada calculada a partir de incertezas padronizadas obtidas de diferentes distribuições pertence a uma distribuição normal e está expressa na forma de um desvio padrão. Com isso pode-se determinar, com base no número de graus de liberdade efetivos, o valor do fator de abrangência que deve ser utilizado para gerar um determinado nível da confiança no resultado da incerteza expandida.

O *Guia* recomenda que a equação de *Welch-Satterwaite* seja utilizada para calcular os graus de liberdade efetivos ν_{eff} , da incerteza expandida, baseada nos graus de liberdade, ν_i , das contribuições individuais da incerteza $u_i(y)$.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

Equação 12 – Graus de liberdade efetivos

Para avaliar o número de graus de liberdade (v_i) de cada componente de incerteza, segue-se o seguinte procedimento:

1. componentes tipo A:

$$\boxed{v = n - 1} \quad \text{Equação 13 - Número de graus de liberdade para componentes tipo A}$$

2. componentes tipo B:

$$v_i = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad \text{Equação 14 - Número de graus de liberdade para componentes tipo B}$$

onde: $\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)}$ é a incerteza relativa de $u(x_i)$.

Geralmente as componentes tipo B são obtidas de distribuições de probabilidades assumidas como sendo retangulares, isso pode ser considerada como uma estimativa conservadora. Ter-se uma estimativa conservadora significa que há uma confiabilidade extremamente alta de que os possíveis valores da grandeza em questão encontrem-se dentro do intervalo da distribuição. Isso equivale a dizer que o número de graus de liberdade tende a infinito ($v_i \rightarrow \infty$).

Assumir que v_i tende ao infinito não causa dificuldades no cálculo do número de graus de liberdade efetivos; pois tomar essa hipótese como verdadeira significa que probabilidade de encontrar, a quantidade em questão, fora do intervalo é muito pequena, ou seja: a distribuição de probabilidade assumida representa a população dos eventos.

Quando $v_{\text{eff}} \geq 30$, pode-se usar, por aproximação, o fator de abrangência $k = 2$, garantindo-se que o nível da confiança vai estar em 95% [NAMAS95].

2.2.7 - Relatando a incerteza

Depois de que a incerteza expandida foi calculada com, no mínimo, um nível da confiança de 95%, o valor do mensurando e a incerteza expandida devem ser escritos da seguinte forma [BIPM93]:

$$y \pm U$$

e acompanhados da seguinte declaração de confiança :

“O valor da incerteza é baseado na incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k = 2$, originando um nível da confiança de aproximadamente 95%.”⁶

Incertezas são geralmente expressas em intervalos bilaterais (\pm) com unidades do mensurando ou, em casos especiais, com valores relativos, por exemplo: porcentagem (%).

2.3 - Metodologias práticas de cálculo da incerteza de medição

2.3.1 - Metodologia geral

Entende-se por *Metodologia Geral* o procedimento que trata o assunto de uma maneira genérica, podendo ser aplicado em vários campos da metrologia. O procedimento genérico que será apresentado foi elaborado por instituições que realizaram pesquisas sobre o cálculo da incerteza e publicaram seus resultados em forma de recomendações ou normas.

Documentos (recomendações ou normas) que contém as diretrizes que definem a aqui chamada “*Metodologia Geral do Cálculo da Incerteza*” são baseados nas definições do *Guia* e estão sendo elaborados e publicados pelas instituições ligadas à metrologia. Foram analisados os seguintes documentos da Tabela 2 [BIPM93, Eur96, Kessel96, NAMAS95, Sin95, Taylor94].

⁶ NAMAS Executive. NIS 3003 - The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations, National Physical Laboratory, England, 1995. pg. 13

Apresenta-se a seguir o que neste trabalho foi chamado de *Metodologia Geral para Cálculo da Incerteza*, que é baseada no estudo das normas e recomendações citadas na Tabela 2. Dá-se uma ênfase especial ao procedimento da recomendação NIS 3003 [NAMAS95], o qual acredita-se estar com um nível de simplificação adequado para um o entendimento da metodologia, sem comprometer a qualidade da avaliação da incerteza.

Tabela 2 – Recomendações e normas relativas ao cálculo da incerteza de medição

Instituição	Documento
BIPM, IEC, IFCC, ISSO, IUPAC, OIML	<i>Guide</i> [BIPM93]
NAMAS Executive, National Physical Laboratory	NIS 3003 [NAMAS95]
European Cooperation for Accreditation of Laboratories	EAL-R2 [Eur96]
PTB – Physikalisch-Tchnische Bundesanstalt	Kessel, W. [Kessel96]
Singapore Institute of Standards and Industrial Research	SINGLAS Technical Guide 1 [Sin95]

A seguir será apresentado de forma simplificada os passos para execução do procedimento de cálculo da incerteza de acordo com a recomendação NIS 3003:

Passos para a execução da *Metodologia Geral do Cálculo da Incerteza*:

01 - Definir o relacionamento matemático entre as estimativas de entrada e as estimativa de saída:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N);$$

02 - Identificar todas as correções que podem ser aplicadas no resultado de medição do mensurando nas condições de medição;

03 - Listar os componentes sistemáticos de incerteza com suas respectivas correções;

Obs.: os componentes sistemáticos não corrigidos serão tratados como incertezas.

04 - Associar incertezas e distribuições de probabilidade com os componentes sistemáticos da incerteza;

05 - Calcular a incerteza padrão de cada componente de incerteza, com as seguintes equações:

Componente

$$u(x_i) = \frac{U}{k}$$

Tipo A:

Equação 15 – Incerteza padrão – Distribuição normal

Componente

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$$

Tipo B:

Equação 16 – Incerteza padrão – Distribuição retangular

ou referenciar outros tipo distribuição de probabilidade assumidas;

06 - Verificar se a componente aleatória de incerteza é significativa em relação às componentes sistemáticas;

07 - Se a componente aleatória da incerteza é significativa, aconselha-se fazer várias medições para a obtenção da média, Equação 1;

08 - Calcular a variância da amostra, Equação 2, e o desvio padrão da média:

$$s(\bar{q}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}$$

Equação 17 – Desvio padrão da média

ou referenciar o resultado de uma repetitibilidade de uma medição prévia que possa ser uma boa estimativa de $s(q_k)$, baseado em um grande número de medições;

09 - Obter a incerteza padrão da componente tipo A:

$$u(x_i) = s(\bar{q})$$

Equação 18 – Incerteza padrão do tipo A

10 - Calcular a incerteza padrão combinada para grandezas de entrada não correlacionadas, Equação 6;

11 - Caso duas ou mais grandezas de entrada sejam correlacionadas, para calcular a incerteza padrão combinada deve-se utilizar: Equação 8, Equação 9 e Equação 10;

12- Calcular a incerteza expandida, Equação 11;

13- Relatar a incerteza expandida de acordo com as recomendações do *Guia*.

2.3.2 - Metodologia simplificada (ISO/TR 14253-2)

O *Technical Report* [ISO/TR 14253-2:1996] é um procedimento prático, baseado no *Guia*, para estimar a incerteza de medição de processos de medição da indústria e aplicados ao controle de produtos com especificações geométricas. Foi elaborado para que seja utilizado para estimar incertezas de medição de:

- um resultado de medição;
- comparação entre dois ou mais resultados de medição;
- comparação de resultados de medição e especificações, para comprovar a conformidade ou não conformidade com uma especificação.

O procedimento baseia-se na implementação de uma ferramenta iterativa que proporciona um auto-ajuste no cálculo da incerteza, até que o valor da incerteza esteja a um nível desejado para o processo em questão. Esse procedimento recebe o nome de **PUMA** (*Procedimento para Gerenciamento da Incerteza de Medição*)⁷. O objetivo desse procedimento é de que a incerteza calculada enquadre-se com a especificação de conformidade, possuindo uma relação preestabelecida com a tolerância, por exemplo (um décimo da tolerância - $U \approx 0,1.T$) [Dietzsch96].

Quando o resultado da incerteza calculada não satisfizer a incerteza alvo, as condições conhecidas ou assumidas: método de medição, procedimento de medição, condições de medição, princípio de medição e incerteza alvo devem ser alteradas, uma de cada vez, até que a condição adequada seja encontrada. O conceito e a metodologia da **ISO/TR 14253-2** estão abordados com maior detalhamento no capítulo 3.

2.4 - A aplicação do cálculo da incerteza combinada na indústria

De acordo com os levantamentos feitos em indústrias [MENNO97, EMBRACO97] pode-se notar que a indústria de fabricação mecânica, de um modo geral, utiliza o valor da incerteza do sistema de medição (**ISM – Inequação 1**) para verificar se um instrumento de medição tem ou não condições de realizar determinada medição com as tolerâncias exigidas. Em vários casos, para que o instrumento seja considerado apto, é assumido que a incerteza do sistema de medição deva ser menor ou igual a um quinto da faixa de tolerância [EMBRACO97].

⁷ No original: *Procedure for Uncertainty of Measurement Management*, tradução do autor.

Para a aplicação do cálculo da incerteza combinada na indústria de fabricação mecânica deve-se fazer uma distinção entre as incertezas calculadas nos laboratórios de metrologia das referidas indústrias, quando da calibração de seus instrumentos de medição, e as incertezas calculadas com o objetivo de complementar a expressão do resultado de medição, que caracterizam a qualidade do resultado de medição.

2.4.1 - Cálculo da incerteza no laboratório de metrologia da indústria

O laboratório de metrologia é o setor da indústria que atualmente possui maior utilização de algum tipo de cálculo visando avaliar a incerteza de medição. Mesmo assim os referidos laboratórios, em sua maioria, executam esses cálculos de uma forma muito simplista, baseando-se somente em um certo número de repetições e calculando tendência [INMETRO95] e repetitividade [INMETRO95] do instrumento de medição, conforme mostra o item 2.1.1.

Esse procedimento é inaceitável, pois dessa forma deixa-se de considerar vários fatores que podem contribuir significativamente para o valor da incerteza combinada. Não se pode negligenciar a importância da análise completa desses fatores que influem no cálculo da incerteza de medição.

Para haver a caracterização da qualidade das medições executadas no processo de fabricação, a incerteza dessas medições deve ser calculada. Isso só será possível se o cálculo da incerteza dos instrumentos de medição seguir um método que possa fornecer informações suficientemente confiáveis, para que essas informações possam ser utilizadas no cálculo da incerteza do processo de medição na chão de fábrica.

O levantamento de informações [EMBRACO97, MENNO97] mostrou que as pessoas que executam a calibração dos instrumentos de medição, nos laboratórios de metrologia das indústrias, geralmente são técnicos metrologistas ou pessoas que possuem, pelo menos, um nível de escolaridade considerado médio (2º grau). Por isso torna-se

perfeitamente viável a execução do cálculo da incerteza dos instrumentos de medição com a utilização de um método relativamente completo.

Entende-se aqui por método relativamente completo aquele que procura avaliar todas as componentes de incerteza das quais se possua informações suficientes, que execute a correção dos efeitos sistemáticos suficientemente conhecidos; que verifique o número de graus de liberdade efetivos da incerteza combinada, e consiga expressar a incerteza expandida com no mínimo 95% de confiança.

Para satisfazer os requisitos mencionados acima, o método de cálculo da incerteza de medição mais adequado é o exposto no item 2.3.1 (Metodologia Geral). Esse método, com as devidas adaptações para enquadrar-se no sistema local de cada indústria, pode facilmente ser implantado para que a incerteza do instrumento de medição calibrado pelo laboratório de metrologia da indústria possa ser útil ao processo de cálculo da incerteza de medição no processo de fabricação.

No entanto não é suficiente um bom nível de escolaridade para que seja possível a execução do cálculo da incerteza nos laboratórios de metrologia das indústrias. Três requisitos são considerados indispensáveis para que a execução do cálculo mencionado acima possa ser conduzido com sucesso. Os requisitos são:

- a) conhecimentos básicos de estatística aplicada à metrologia;
- b) conhecimentos de instrumentação;
- c) conhecimentos básicos dos processos de fabricação envolvidos.

Neste trabalho é considerado hipótese básica que as indústrias, em seus laboratórios de metrologia, possuam pessoal com treinamento nos quesitos mencionados acima. Somente assim, será possível a utilização desses métodos considerados completos dentro dos laboratórios de metrologia da indústria.

2.4.2 - Cálculo da incerteza de medição no processo de fabricação

Na grande maioria das aplicações industriais, a função da incerteza de medição no processo de fabricação é determinar se o instrumento está ou não apto para executar uma medição de uma dimensão a qual está associada a uma certa tolerância. Nem sempre se consideram as diferenças existentes entre a medição feita em laboratório (calibração) e a medição feita em um ambiente fabril.

É evidente que o valor da incerteza combinada de uma medição, realizada sob condições não controladas, não pode ser o mesmo que o valor da incerteza combinada calculada no ato da calibração do instrumento. O valor da incerteza obtido na calibração é somente uma componente da incerteza combinada de uma medição realizada com o mesmo instrumento sob condições externas diferentes.

No processo de fabricação o resultado de medição é comparado com a especificação para comprovar a conformidade ou a não-conformidade [ISO 14253-1:1996]. Para cumprir com êxito tal tarefa o processo de medição deve fornecer resultados que sejam confiáveis e que apresentem a manutenção da qualidade dos mesmos ao longo do tempo. Essa confiabilidade só pode ser quantificada através da avaliação da incerteza de medição.

O **RM** (resultado da medição) vai indicar se o produto fabricado enquadra-se ou não na especificação, ou seja, se está ou não dentro da faixa de tolerância. Sempre haverá o risco da aceitação de peças não-conformes, e também o risco da rejeição de peças conformes [ROSS91]. Para que o **RM** seja útil, no processo de avaliação com a conformidade, o mesmo deve estar associado com uma **IM** que seja suficientemente pequena, em relação ao intervalo de tolerância (**IT**), garantindo assim uma baixa probabilidade de erros de classificação de conformidade.

Torna-se notória a necessidade de determinar-se um método que seja prático para a avaliação da **IM** dos processos de medição utilizados na indústria. O método mencionado no item 2.3.2 pode proporcionar esta praticidade, pois o mesmo baseia-se em

ajustes de vários parâmetros, que influenciam no valor da incerteza, até que a incerteza expandida (U) satisfaça o nível da incerteza preestabelecida para que o processo de medição possa ser considerado metrologicamente aceitável.

Portanto, para o cálculo da **IM** para os processos de fabricação mecânica, este trabalho recomenda basear-se no **PUMA** (Procedimento de Gerenciamento da Incerteza de Medição) [ISO/TR 14253-2:1996]. Julgou-se conveniente, no contexto deste trabalho, uma análise detalhada do **PUMA** visando uma reflexão crítica acerca da metodologia do mesmo, bem como uma comparação com os procedimentos do *Guia*. Essa análise será executada no capítulo 3.

3. – Análise da metodologia do PUMA (Procedimento para Gerenciamento da Incerteza)

A indústria, geralmente, executa inspeções (medições) com a intenção de averiguar se o produto inspecionado encontra-se dentro ou fora da zona de conformidade [ISO 14253-1:1996]. A razão entre a incerteza de medição e o Intervalo de Tolerância (IT) é um fator importantíssimo na configuração da abrangência da zona de conformidade em relação à zona de tolerância [Dietzsch96], Figura 7.

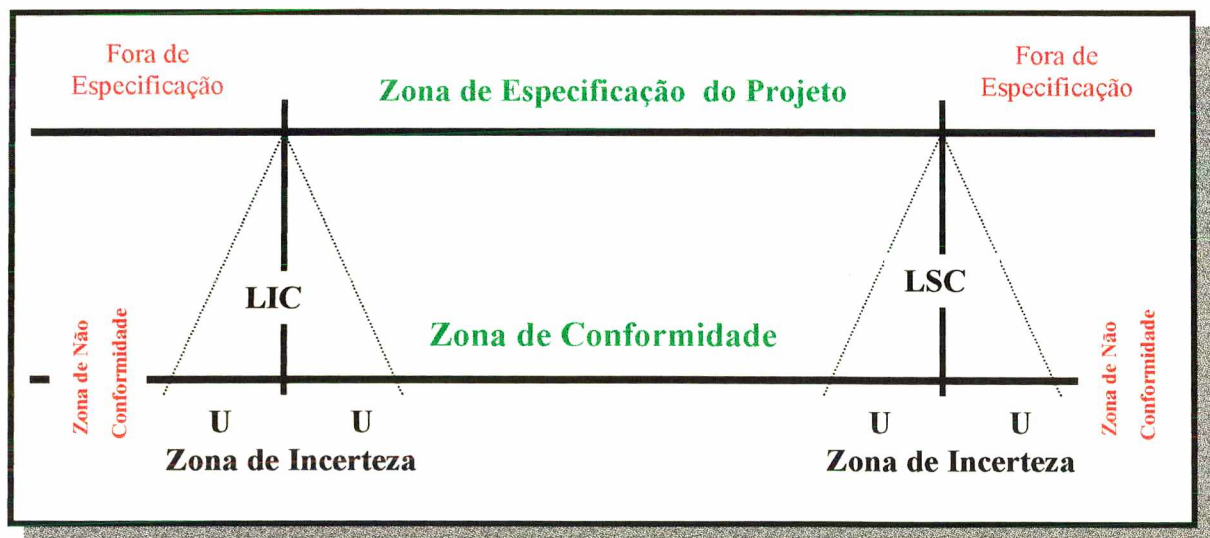


Figura 7 - Incerteza expandida de acordo com ISO/TR 14253-2

Para estabelecer um método que permita alcançar uma relação incerteza/tolerância (IM/IT) fornecendo uma abrangência da zona de conformidade adequada ao processo em questão, elaborou-se o **PUMA**. O *Procedimento para Gerenciamento da Incerteza de Medição (PUMA)* foi implementado de acordo com os conceitos básicos do *Guia* para ser aplicado na indústria nos seguintes casos:

1. calibração de padrões;

2. calibração de equipamentos de medição da área dimensional;
3. medições de peças fabricadas.

O PUMA adota algumas definições específicas [ISO/TR 14253-2:1996]; as de crucial importância para o entendimento do procedimento são⁸:

- *Incerteza estimada* U_{EN} : (approximated uncertainty) incerteza de medição estimada pelo método iterativo. O índice “N” mostra que U_{EN} foi obtida na enésima iteração.
- *Incerteza alvo* U_T : (target uncertainty) incerteza considerada aceitável para a medição em questão.

O PUMA é baseado em uma sequência de tarefas bem definidas; essa sequência tem como objetivo gerar um processo iterativo que torna o cálculo da IM economicamente auto-ajustável [ISO/TR 14253-2:1996]. Neste trabalho considera-se que um processo é economicamente auto-ajustável quando possui a capacidade de enquadrar-se a vários níveis de complexidade exigidos para o cálculo da incerteza, em distintas aplicações do mesmo. A descrição detalhada do procedimento pode ser resumida na sequência de tarefas da Tabela 3 e no fluxograma da Figura 8.

3.1 – O processo iterativo

De acordo com o fluxograma do PUMA nota-se que todo o procedimento baseia-se no chamado “processo iterativo”, que faz com que através de modificações em certas condições de contorno se obtenha um valor para a incerteza estimada (U_{EN}). O processo estabelece uma metodologia bem definida, através de um caminho lógico, que facilita a tomada de decisões necessárias à obtenção da incerteza alvo (U_T). Além disso, fornece uma orientação prática para a identificação das variáveis influentes no cálculo da incerteza. A referência [BARP98] apresenta uma proposta de aplicação do PUMA ao projeto de cadeias de medição.

Geralmente, a indústria somente está interessada em determinar se a medição possui ou não uma incerteza menor ou igual ao patamar previamente definido. O

⁸ Traduções do autor

PUMA foi elaborado para ser aplicado em calibrações e medições da indústria, visando atender o requisito acima. Utilizando o **PUMA** pode-se calcular a incerteza de uma medição e compará-la com a incerteza alvo (*que é o patamar previamente definido*).

Tabela 3 - Detalhamento do PUMA

Tarefa	Item
a) definir tarefa de medição e determinar a incerteza alvo (U_T);	① e ②
b) escolher o princípio de medição – baseando-se na experiência e nos instrumentos de medição que estiverem à disposição;	③
c) estabelecer e documentar o método, procedimento e condições de medição;	④, ⑤ e ⑥
d) calcular a primeira estimativa do valor da incerteza expandida (U_{E1})	⑦, ⑧ e ⑨
e) comparar a primeira estimativa da incerteza, U_{E1} , com a incerteza alvo, U_T : e.1) se U_{E1} é aceitável ($U_T \geq U_{E1}$), então o procedimento de medição é adequado para obter-se a incerteza alvo; e.2) se $U_{E1} \ll U_T$ o procedimento de medição é tecnicamente aceitável, porém é aconselhável uma avaliação do custo desse procedimento de medição; e.3) se U_{E1} não é aceitável ($U_{E1} > U_T$) o processo iterativo continua;	⑩
f) antes de dar continuidade ao processo, é necessário avaliar quais são as componentes de incerteza mais significativas;	
g) mudam-se considerações ou acrescenta-se conhecimento sobre as componentes de incerteza mais significativas;	⑪ e ⑫
h) calcular a segunda estimativa da incerteza expandida U_{E2} ;	⑦, ⑧ e ⑨
i) comparar a Segunda estimativa da incerteza, U_{E2} , com a incerteza alvo, U_T : i.1) se U_{E2} é aceitável ($U_T \geq U_{E2}$), então o procedimento de medição é adequado para obter-se a incerteza alvo; i.2) se U_{E2} não é aceitável ($U_{E2} > U_T$), então uma terceira iteração (e possivelmente mais) é necessária;	⑩
j) quando todas as alternativas de mudança nos conhecimentos e/ou considerações assumidas para o cálculo da incerteza de medição foram utilizadas, e mesmo assim não foi obtido um valor aceitável para a incerteza expandida, modifica-se o método ou o procedimento de medição, visando diminuir o valor da incerteza, reiniciando o processo iterativo;	⑬ e ⑭
k) se as mudanças no método e no procedimento de medição não propiciaram um valor de incerteza expandida aceitável, muda-se o princípio de medição e reinicia-se o processo iterativo;	⑬ e ⑭
l) se a mudança no princípio de medição não forneceu um valor de incerteza expandida aceitável, resta somente a alternativa de modificar a incerteza alvo ou a tarefa de medição.	⑬ e ⑭

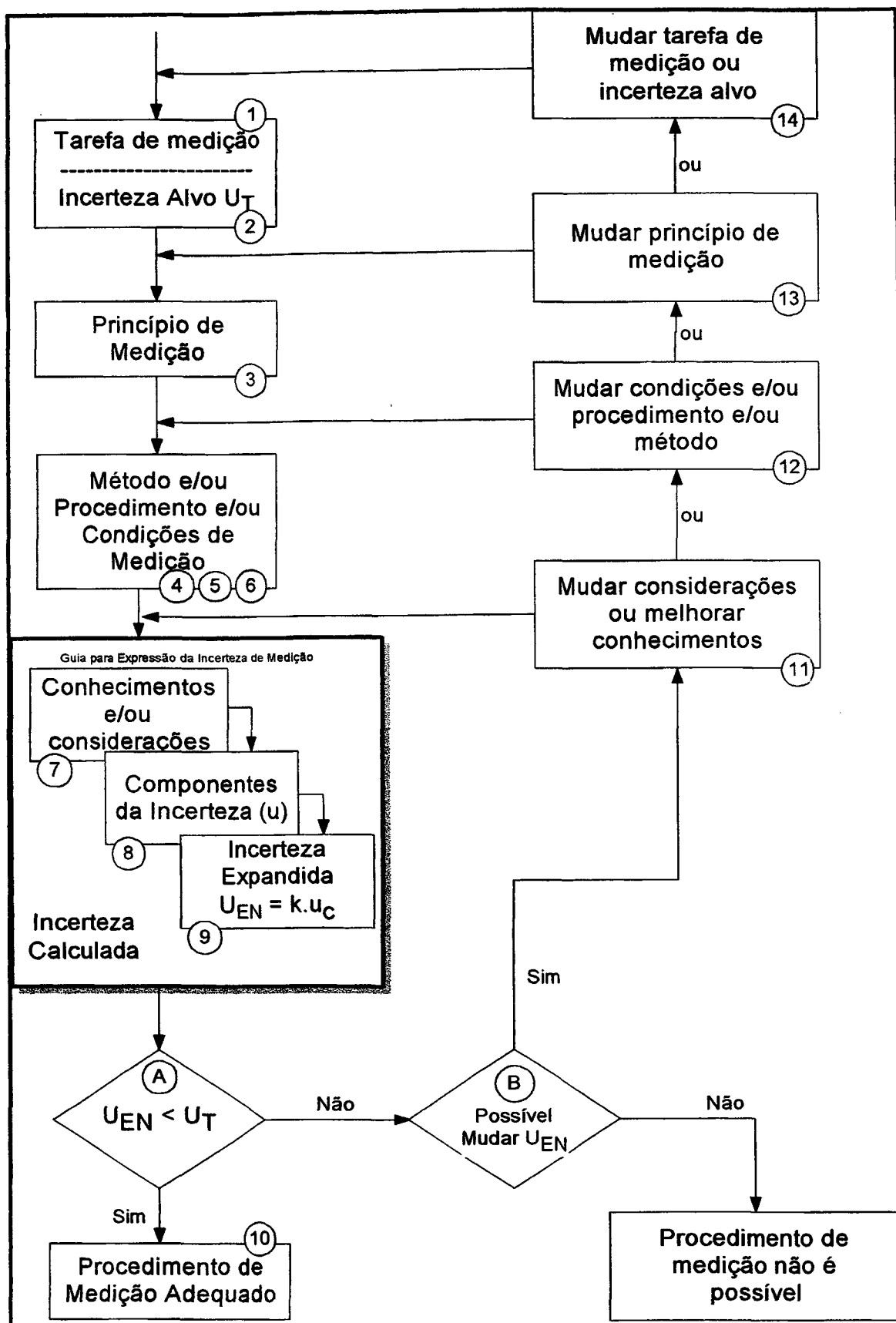


Figura 8- PUMA

O processo iterativo sugere que seja seguida uma seqüência fixa de itens a serem modificados, enquanto a incerteza alvo não tiver sido atingida. A seqüência que o PUMA sugere pode ser visualizada na Figura 8 e na Tabela 4, que mostra as possíveis mudança mostradas no fluxograma do PUMA.

Tabela 4 – Seqüência do processo iterativo

Estimativa	Item	Modificação	Item Modificado
1ª	(11)	Mudar considerações ou melhorar conhecimentos	(7)
2ª	(12)	Mudar condições de medição	(6)
3ª	(12)	Mudar procedimento de medição	(5)
4ª	(12)	Mudar método de medição	(4)
5ª	(13)	Mudar princípio de medição	(3)
6ª	(14)	Mudar tarefa de medição ou incerteza alvo	(12) ou (2)

No entanto existem processos de medição onde, por exemplo, não é possível modificar as condições de medição; ou uma modificação não pode ser implementada com facilidade. Portanto aconselha-se que a seqüência de modificações, nos itens que envolvem a medição, sejam executadas baseando-se na situação existente e no bom senso em modificar o item que produzirá um efeito mais significativo no valor da incerteza estimada U_{EN} , sem comprometer o custo do processo de medição.

Com base no exposto acima, acredita-se que o processo iterativo do PUMA possui praticidade e aplicabilidade para ser utilizado na indústria, como uma ferramenta para o cálculo da incerteza de medição em processo produtivos.

3.2 – O processo de cálculo da incerteza

3.2.1 - Método de medição direta

Neste método, chamado pelo PUMA de *Método da Caixa Preta*, o processo de medição é modelado como sendo uma caixa preta da qual não se conhece o conteúdo.

Através desse método, o resultado de medição é obtido da leitura (X) com as eventuais correções conhecidas (C), **Equação 19**.

$$\boxed{Y = X + C} \quad \text{Equação 19 – PUMA – Medição direta}$$

Todos erros conhecidos devem ser compensados do valor da leitura obtida. Depois das devidas correções terem sido efetuadas, a incerteza combinada é obtida através da **Equação 20**:

$$\boxed{u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum_1^p u_p^2}} \quad \text{Equação 20 – PUMA – Incerteza combinada (Medição direta)}$$

onde: p é o número de componentes de incerteza não correlacionadas,

u_r é a soma dos componentes de incerteza fortemente correlacionadas ($\rho = 1$ ou -1), que são calculados pela **Equação 21**:

$$\boxed{u_r = \sum_1^b u_b} \quad \text{Equação 21 – PUMA – Incerteza padrão (Medição direta)}$$

onde: b é o número de componentes de incerteza fortemente correlacionadas.

3.2.2 - Método de medição indireta

Neste método, chamado pelo PUMA de *Método da Caixa Branca*, o valor do mensurando é considerado como sendo uma função de vários valores medidos; esses por sua vez podem ser obtidos tanto pelo método direto como pelo indireto. O mensurando é definido pela função:

$$\boxed{Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{p+r})} \quad \text{Equação 22 – PUMA – Mensurando}$$

Assim como na medição direta (item 3.2.1), todos os erros conhecidos devem ser compensados. Após as correções, a incerteza combinada é obtida através da seguinte **Equação 23**:

$$\boxed{u = \sqrt{u_r^2 + \sum_{i=1}^p \left(\frac{\delta Y}{\delta X_i} \times u_{xi} \right)^2}} \quad \text{Equação 23 – PUMA – Incerteza combinada (Medição indireta)}$$

onde: u_r é a soma dos componentes de incerteza fortemente correlacionadas ($\rho = 1$ ou -1), que são calculados pela **Equação 24**:

$$u_r = \sum_{i=1}^r \left(\frac{\delta Y}{\delta X_i} \times u_{xi} \right) \quad \text{Equação 24 – PUMA – Incerteza padrão}$$

(Medição indireta)

onde: $\delta Y/\delta X_i$ é a diferencial parcial da função Y com relação a X_i .

Em ambos os métodos (medição direta e indireta), as componentes não correlacionadas são adicionadas geometricamente (raiz quadrada da soma dos quadrados); e as componentes fortemente correlacionadas são adicionadas aritmeticamente. Através destes cálculos faz-se uma estimativa conservadora, pois grandezas que podem não ser totalmente correlacionadas serão consideradas fortemente correlacionadas, pois os coeficientes de correlação utilizados são unicamente 1 e -1.

3.3 - Facilidades em relação ao *Guia*

O processo de cálculo do **PUMA** é baseado no *Guia*, portanto não existem diferenças significativas quanto à execução dos cálculos. Em algumas etapas do cálculo da incerteza de medição o **PUMA** simplifica certas considerações, que são:

- *Grandezas correlacionadas:*

No caso de componentes que possuem correlação, o **PUMA** assume somente coeficientes de correlação 1 ou -1, não se preocupando com nenhum cálculo adicional. Esse fato pode gerar tanto estimativas muito pessimistas como também muito otimistas, pois considerar componentes fortemente correlacionadas positivamente, poderá gerar uma super estimação da incerteza; o inverso pode acontecer no caso de considerar componentes fortemente correlacionadas negativamente. No entanto, as facilidades no processo de cálculo, que esta simplificação produz, pode ser compensadora em alguns casos.

- *Fator de Abrangência:*

O **PUMA** não menciona nenhum método para o cálculo dos números de graus de liberdade efetivos, que segundo o *Guia*, determinam o valor do fator de abrangência k . Através do **PUMA** utiliza-se somente o valor $k = 2$, considerando assim, que o nível da confiança está em 95%. De acordo com o item 2.2.6, essa consideração é válida, pois utilizando o **PUMA** geralmente o número de graus de liberdade efetivos será maior do que trinta ($v_{\text{eff}} \geq 30$) devido à grande maioria das componentes serem avaliadas pelo método do tipo B, garantindo assim o nível da confiança indicado.

- *Incerteza Alvo:*

O fato de que utilizando o **PUMA** procura-se somente executar um cálculo de incerteza de medição visando satisfazer uma condição de teste ($U_T \geq U_{EN}$), faz com que as atenções sejam voltadas somente para as componentes de incerteza que mais afetam a incerteza final. Dessa forma deixa-se em segundo plano as componentes que pouco influem na incerteza final e que, de acordo com o *Guia*, também deveriam ser consideradas. Como através do **PUMA** o cálculo da incerteza procura sempre o *pior caso*, essa simplificação não gera problemas para a estimativa do valor da incerteza, pois se a incerteza calculada satisfaz a Incerteza Alvo, pode-se dizer que mesmo com uma incerteza superestimada (pior caso) os resultados das medições satisfazem as exigências metrológicas do processo em questão.

O chamado *processo iterativo*, como citado no item 3.1, é uma ferramenta que facilita a execução do cálculo da incerteza de medição, pois o mesmo orienta a fase de definições básicas e também a fase de “refinamento” do cálculo.

3.4 – Exemplo de utilização do PUMA

Para exemplificar a utilização do **PUMA** será apresentado um processo de cálculo de incerteza envolvendo a medição de uma dimensão de uma peça com valor nominal de 100 mm. Com a intenção de demonstrar o funcionamento do processo iterativo do **PUMA** as condições escolhidas para a medição não fornecem uma incerteza aproximada (U_{EN}) que satisfaça a incerteza alvo (U_T) definida, fazendo com que seja necessário executar alguma modificação, conforme estabelece o processo iterativo.

O exemplo que está mostrado a seguir, é baseado na referência [Dietzsch96]. No referido exemplo, são realizadas várias iterações até que a incerteza alvo seja alcançada. Aqui somente está apresentada a primeira iteração, pois julga-se ser suficiente para o entendimento do processo.

Procedimento para Gerenciamento da Incerteza de Medição – Exemplo de Utilização

1. Tarefa de medição: peça com valor nominal de 100 mm;
2. Incerteza alvo: de acordo com a regra $U_T = T/10$.

Tabela 5 – Determinação da U_T

Grau de tolerância	Valor da tolerância	Incerteza alvo
IT 12	0,350 mm	0,0350 mm

Tabela 6 – Exemplo de utilização do PUMA – 1ª estimativa

Item	Definições da primeira estimativa													
①	Tarefa de medição	Medição de um comprimento $L = 100\text{ mm}$												
②	Incerteza alvo	$U_T = T/10$												
③	Princípio de medição	Medição mecânica e direta do comprimento através de um paquímetro												
④	Método de medição	Medição absoluta do comprimento Indicação analógica												
⑤	Procedimento de medição	Simplex medição												
⑥	Condições de medição	Temperatura: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ Material do instrumento de medição: aço Material do mensurando: alumínio												
⑦	<p>Considerações</p> <p>x_1: erro máximo admissível para o instrumento de medição escolhido, componente tipo B, distribuição retangular; a_1: valor do erro máximo admissível, permitindo pela norma DIN, para o instrumento escolhido; x_2: incerteza de medição pelo arredondamento da leitura (componente tipo B, distribuição retangular); a_2: valor máximo da incerteza, estimado por conhecimento prévio; x_3: incerteza de medição devido à influência da temperatura (componente tipo B, distribuição retangular); a_3: ΔL (para o pior caso); t_M = temperatura do mensurando: 25°C; t_G = temperatura do instrumento de medição: 15°C; Coeficiente de expansão térmica do instrumento de medição: $\alpha_G = 11,5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (aço) Coeficiente de expansão térmica do mensurando: $\alpha_M = 25 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (alumínio)</p>													
⑧	<p>Componentes de incerteza</p> <table><tr><td>$u(x_1) = 0,58 a_1$</td><td>$a_1 = 0,050\text{ mm}$ (para $L = 100\text{ mm}$)</td><td>$u(x_1) = 0,029\text{ mm}$</td></tr><tr><td>$u(x_2) = 0,58 a_2$</td><td>$a_2 = (\text{div.escala})/2 = 0,1 / 2 = 0,050\text{ mm}$</td><td>$u(x_2) = 0,029\text{ mm}$</td></tr><tr><td>$u(x_3) = 0,58 a_3$</td><td>$a_3 = \Delta L$</td><td>$u(x_3) = 0,010\text{ mm}$</td></tr><tr><td colspan="3">$\Delta L = L[\alpha_M(t_M - 20^\circ\text{C}) - \alpha_G(t_G - 20^\circ\text{C})] \Rightarrow a_3 = 0,017\text{ mm}$</td></tr></table>		$u(x_1) = 0,58 a_1$	$a_1 = 0,050\text{ mm}$ (para $L = 100\text{ mm}$)	$u(x_1) = 0,029\text{ mm}$	$u(x_2) = 0,58 a_2$	$a_2 = (\text{div.escala})/2 = 0,1 / 2 = 0,050\text{ mm}$	$u(x_2) = 0,029\text{ mm}$	$u(x_3) = 0,58 a_3$	$a_3 = \Delta L$	$u(x_3) = 0,010\text{ mm}$	$\Delta L = L[\alpha_M(t_M - 20^\circ\text{C}) - \alpha_G(t_G - 20^\circ\text{C})] \Rightarrow a_3 = 0,017\text{ mm}$		
$u(x_1) = 0,58 a_1$	$a_1 = 0,050\text{ mm}$ (para $L = 100\text{ mm}$)	$u(x_1) = 0,029\text{ mm}$												
$u(x_2) = 0,58 a_2$	$a_2 = (\text{div.escala})/2 = 0,1 / 2 = 0,050\text{ mm}$	$u(x_2) = 0,029\text{ mm}$												
$u(x_3) = 0,58 a_3$	$a_3 = \Delta L$	$u(x_3) = 0,010\text{ mm}$												
$\Delta L = L[\alpha_M(t_M - 20^\circ\text{C}) - \alpha_G(t_G - 20^\circ\text{C})] \Rightarrow a_3 = 0,017\text{ mm}$														
⑨	<p>Incerteza expandida</p> <table><tr><td colspan="2">$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2} = 0,042\text{ mm}$</td></tr><tr><td>$U_{E1} = 2 u_c$</td><td>$U_{E1} = 0,084\text{ mm}$</td></tr></table>		$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2} = 0,042\text{ mm}$		$U_{E1} = 2 u_c$	$U_{E1} = 0,084\text{ mm}$								
$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2} = 0,042\text{ mm}$														
$U_{E1} = 2 u_c$	$U_{E1} = 0,084\text{ mm}$													

Portanto é necessário promover alguma modificação e proceder-se a segunda estimativa.

Obs.: As modificações executadas estão indicadas em **negrito** e *itálico*.

Tabela 7 - Exemplo de utilização do PUMA – 2ª estimativa

Item	Definições da Segunda estimativa	
①	Tarefa de medição	Medição de um comprimento $L = 100\text{ mm}$
②	Incerteza alvo	$U_T = T/10$
③	Princípio de medição	Medição mecânica e direta do comprimento através de um <i>paquímetro digital</i>
④	Método de medição	Medição absoluta do comprimento <i>Indicação digital</i>
⑤	Procedimento de medição	Simplex medição
⑥	Condições de medição	Temperatura: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ Material do instrumento de medição: aço Material do mensurando: alumínio
⑦	Considerações	
	x_1 : erro máximo admissível para o instrumento de medição escolhido (componente tipo B, distribuição retangular); a_1 : valor do erro máximo admissível, permitindo pela norma DIN, para o instrumento escolhido; x_2 : <i>incerteza de medição pela digitalização da leitura</i> (componente tipo B, distribuição retangular); a_2 : valor máximo da incerteza, <i>estimado pelo incremento digital do display</i> ; x_3 : incerteza de medição devida à influência da temperatura (componente tipo B, distribuição retangular); a_3 : ΔL (para o pior caso); t_M = temperatura do mensurando: 25°C ; t_G = temperatura do instrumento de medição: 15°C ; Coeficiente de expansão térmica do instrumento de medição: $\alpha_G = 11,5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (aço) Coeficiente de expansão térmica do mensurando: $\alpha_G = 25 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (alumínio)	
⑧	Componentes de incerteza	
	$u(x_1) = 0,58\ a_1$ $a_1 = 0,025\text{ mm}$ (para $L = 100\text{ mm}$) $u(x_2) = 0,58\ a_2$ $a_2 = (\textit{incremento digital})/2 = 0,01 / 2 = 0,005\text{ mm}$ $u(x_3) = 0,58\ a_3$ $a_3 = \Delta L$ $\Delta L = L[\alpha_M(t_M - 20^\circ\text{C}) - \alpha_G(t_G - 20^\circ\text{C})] \Rightarrow a_3 = 0,017\text{ mm}$	
		$u(x_1) = 0,0145\text{ mm}$ $u(x_2) = 0,0029\text{ mm}$ $u(x_3) = 0,010\text{ mm}$
⑨	Incerteza expandida	
	$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2} = 0,018\text{ mm}$ $U_{EI} = 2\ u_c$ $U_{EI} = 0,036\text{ mm}$ $U_{E2} = 0,036\text{ mm} > U_T = 0,0350\text{ mm}$	

Como se pode observar, de uma estimativa para outra obtêm-se uma diminuição significativa no valor da incerteza aproximada U_{EN} . Neste caso, nota-se que ainda não foi alcançada a incerteza alvo, portanto seria necessário executar mais iterações. No entanto, com apenas esse pequeno exemplo é possível ilustrar o modo de funcionamento do **PUMA**.

3.5 – Aplicação do PUMA na Indústria

De acordo com o exposto no item 2.4, na indústria existem dois níveis diferenciados de cálculo da incerteza de medição: o do laboratório de metrologia da indústria e o do chão de fábrica. No laboratório de metrologia da indústria se calcula a incerteza de medição do instrumento, no ato de sua calibração. No chão de fábrica o cálculo da incerteza de medição se refere ao resultado de medição.

No primeiro caso, a incerteza é um parâmetro relacionado com o instrumento de medição, utilizado em condições bem definidas. No segundo caso, a incerteza é um parâmetro relacionado com o resultado de medição, obtido por um determinado instrumento de medição, nas condições do instante da medição. Portanto, o cálculo da incerteza no laboratório de metrologia da indústria tem como objetivo qualificar o instrumento de medição; e o cálculo da incerteza de medição no chão de fábrica qualifica o resultado de medição gerado por um determinado instrumento, quando da sua utilização para controle de produtos ou de processos de fabricação.

Baseando-se nas pesquisas realizadas nas indústrias de fabricação mecânica [EMBRACO97, MENNO97, VOLKSWAGEN98], pode-se concluir que a única necessidade da indústria, no que diz respeito à incerteza de medição no chão de fábrica, é saber se os resultados de medição gerados por um determinado instrumento, possuem ou não uma incerteza aceitável em relação à faixa de tolerância do processo. O **PUMA** visa atender essa necessidade, pois a incerteza alvo é geralmente definida como sendo uma fração da faixa de tolerância.

Através da definição da incerteza alvo em função da faixa de tolerância do processo e utilizando o **PUMA** para calcular a incerteza de medição é possível determinar se o nível da **IM** do resultado de medição é aceitável ou não para o referido processo. Portanto, pode-se dizer que o **PUMA** pode auxiliar no cálculo da incerteza de medição em conformidade com os requisitos atuais das indústrias.

4. - Técnicas de Garantia da Qualidade Relacionadas com a Medição

4.1 - Controle estatístico de processo - CEP

O CEP (Controle Estatístico de Processo) é um método preventivo que compara continuamente os resultados de um processo com um padrão, identificando, a partir de dados estatísticos, as tendências para variações significativas, eliminando ou controlando essas variações com o objetivo de reduzi-las, buscando estabilizar o processo de manufatura [For95a] . Com o uso de técnicas estatísticas para a análise do processo ou seus resultados (produtos), pode-se agir adequadamente a fim de alcançar e manter um nível de capacidade e estabilidade desse processo, com o objetivo final de garantir, com produtividade, a qualidade dos itens produzidos [Hradesky89].

As causas das variações no processo podem ser divididas em dois grupos:

- a) Causas Comuns - são as fontes de variações inerentes ao processo que encontram-se sob controle estatístico;
- b) Causas Especiais - são fontes relativamente grandes de variações, as quais são identificáveis.

4.1.1 – Coleta e organização de dados

A partir de um conjunto de dados (geralmente baseados em medições), retirados de um processo que se queira analisar, o CEP realiza um conjunto de cálculos que possibilitam um estudo das condições de tal processo. Logo, torna-se visível a importância desse conjunto (amostra) de dados, visto que, se os cálculos forem feitos

baseados em dados que não representam o processo, os resultados não irão refletir exatamente o comportamento do mesmo. Os dados (medições) devem refletir a realidade do processo de manufatura, pois é a partir deles que as decisões são tomadas em uma empresa. Se os dados forem tendenciosos, as informações serão erradas, levando a decisões que comprometem a qualidade do processo de manufatura.

Os propósitos da coleta de dados em um processo, dentre outros são:

- a) auxiliar o entendimento de um processo (para que seja possível responder a pergunta: *o que o processo está produzindo?*);
- b) verificar se o processo está produzindo de acordo com o esperado, dentro do especificado;
- c) verificar se qualquer intervenção (regulagem ou ajuste) alterou o processo;
- d) baseado em históricos e na situação atual, prever o que poderá acontecer no futuro.

Outro aspecto importante é a organização dos dados, a qual facilita o seu manuseio. Tendo em mãos dados que sejam representativos do processo, dispostos corretamente, pode-se tirar conclusões e descrever o processo no tempo, mostrando por exemplo:

- a) número de defeitos;
- b) localização dos defeitos;
- c) dimensão das peças.

Uma forma, muito utilizada, de organizar esses dados é utilizar as folhas de controle. Essas folhas são uma espécie de formulário e possuem campos de interesse sobre o processo. As folhas de controle contêm as Cartas de Controle (item 4.1.2) que geralmente são preenchidas pelo próprio operador do processo. Outra forma de proceder-se à coleta dos dados é a utilização de coletores de dados industriais. Esses equipamentos, além de propiciarem grande rapidez na transmissão dos dados, eliminam erros de transcrição, dando maior confiabilidade ao sistema como um todo.

4.1.2 – Cartas de controle

Um processo estatisticamente sob controle pode ser descrito em função de duas características fundamentais: sua centralização (em relação ao IT) e sua dispersão [Lourenço82]. A centralização do processo pode ser verificada calculando-se a média de várias amostras (ou dados) e a dispersão pode ser estimada a partir do desvio padrão experimental ou amplitude de uma série de amostras (ou dados).

Uma carta de controle é um gráfico que estabelece os limites dentro dos quais uma variável do processo ou característica de qualidade do produto deve se manter ao longo do tempo, ou seja, é uma ferramenta para determinar o grau de estabilidade e capacidade de seu processo [Duncan65]. A interpretação das Cartas de Controle é, geralmente, baseada em análises conjuntas da média (ou mediana) e o desvio padrão ou amplitude das medidas obtidas.

As cartas de controle mais utilizadas são as que combinam a avaliação da média e da amplitude das medidas. Essa ampla utilização se justifica porque através dessa análise é possível se ter uma idéia tanto do comportamento sistemático (observando a média) da grandeza sob controle estatístico como também do comportamento aleatório (observando a amplitude) da mesma.

Como se pode notar, todo o procedimento do CEP utiliza as medições realizadas durante o processo de fabricação, como base para cálculos e decisões. Disso, conclui-se que a qualidade das medições executadas no chão de fábrica é um fator importantíssimo para um bom funcionamento do CEP [Hradesky89].

4.2 - Qualificação de instrumentos de medição

Uma das formas de qualificar um instrumento de medição, para um determinado processo de fabricação, é a avaliação da relação entre a faixa de tolerância e a incerteza de medição, considerando-se as condições reais de uso do instrumento (ver item 1.3). Outro método para qualificar instrumentos de medição é apresentado em um manual,

que é parte integrante da **QS 9000**⁹, chamado *Análise de Sistemas de Medição*¹⁰ (**MSA**). Esse manual foi elaborado por um grupo de trabalho, constituído de especialistas das indústrias automobilísticas *Chrysler, Ford e General Motors*. Uma análise mais detalhada do conteúdo desse manual é feita nos itens que seguem.

4.2.1 – Finalidade do MSA

Geralmente, as decisões relativas aos processos de manufatura são tomadas com base em resultados de medição. Para que essas decisões sejam confiáveis é necessário assegurar um alto nível de qualidade nos resultados de medição. A qualidade dos resultados de medição está relacionada com as características estatísticas dos mesmos [For95].

O processo de medir pode ser visto como um processo de manufatura que produz números (medidas). Em um processo de manufatura normal o que indica se o mesmo encontra-se ou não sob controle são as características estatísticas dos seus resultados. Portanto pode-se usar os mesmos conceitos e filosofia para avaliar o processo de medição.

O documento *Análise de Sistemas de Medição (MSA)* propõe um procedimento que visa avaliar a qualidade dos instrumentos de medição. O principal objetivo do estudo dos sistemas de medição é obter informações relativas a quantidades e tipos de variações nas medições, associadas com o instrumento de medição, quando o mesmo é aplicado para controle geométrico do processo de manufatura [For95].

4.2.2 – Características estatísticas dos resultados de medição

O estudo das características estatísticas dos resultados de medição irá fornecer uma avaliação do instrumento de medição, dizendo se o mesmo produz resultados aceitáveis ou não [Hradesky89]. Esse estudo é, geralmente, realizado para:

⁹ “Quality Systems Requirement” - Conjunto de recomendações criadas pelas indústrias automobilísticas americanas, para qualificação e avaliação de seus fornecedores.

¹⁰ Do original: Measurement Systems Analysis, tradução do autor.

- avaliar novos equipamentos de medição ou novos métodos de inspeção;
- comparar um equipamento de medição em relação a outro do mesmo tipo;
- comparar equipamentos de medição antes e depois de reparos ou de ajustes;
- comparar técnicas de inspeção entre fornecedores e entre inspeção final de fornecedores e inspeção de recebimento de clientes;
- estimar as variações e o nível de aceitabilidade para um processo de produção.

As principais características estatísticas associadas aos resultados de medição que servem de base para a avaliação dos instrumentos de medição estão definidas a seguir. Algumas das definições são baseadas no **VIM**.

Tendência (VIM - definição 5.25): “*Tendência (de um instrumento de medição): Erro sistemático da indicação de um instrumento de medição.*”

Repetitividade (VIM - definição 3.6): “*Repetitividade (de resultados de medições): Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.*”

Reprodutibilidade (VIM - definição 3.7): “*Grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição.*”

Estabilidade (VIM - definição 5.14): “*Aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.*”

4.2.3 - Avaliação do instrumento de medição

O primeiro passo para avaliar um instrumento de medição é determinar se o mesmo possui capacidade de detectar e indicar as variações na característica medida. Essa capacidade pode ser avaliada pelo valor da resolução do instrumento de medição [For95].

Uma forma de verificar se a resolução do instrumento é adequada para determinado processo pode ser obtida através da avaliação de uma *carta de controle da amplitude* (ver item 4.1.2) do processo em questão, baseando-se em medições efetuadas com o instrumento a ser avaliado.

Essa carta de controle pode indicar duas situações onde a resolução do instrumento deve ser considerada inadequada para o controle do processo. Nessas situações a carta de controle apresenta [For95]:

1. Somente um, dois ou três valores de amplitude dentro dos limites de controle;
2. Quatro valores de amplitude dentro da faixa de controle, sendo que mais de um quarto das amplitudes são iguais a zero.

O MSA recomenda que a resolução do instrumento de medição seja no máximo um décimo do valor equivalente a seis desvios padrão da distribuição do processo, ou um décimo da tolerância do processo [For95].

a) Determinação da estabilidade

O tempo é um importante fator na análise da estabilidade estatística de qualquer processo. A mais importante consideração sobre a estabilidade é relativa às condições a que o sistema está exposto durante a análise da estabilidade. A análise da estabilidade não pode ser realizada sem um prévio conhecimento do comportamento do sistema a ser avaliado.

A estabilidade estatística pode ser determinada através de cartas de controle. Os procedimentos para essa determinação são apresentados a seguir [For95]:

1. Estabelecer uma amostra como sendo o valor de referência para a análise; essa amostra pode ser uma parte da produção (o conhecimento do valor de referência não é requerido para a avaliação da estabilidade do instrumento de medição).
2. Em um determinado período (diariamente, semanalmente), medir a amostra; (o tamanho da amostra e a frequência com que será medida deve ser determinada com base em conhecimentos prévios sobre o processo e sobre o instrumento de medição).
3. Construir a carta de controle, com base nos dados obtidos.
4. Estabelecer os limites de controle e analisar as cartas de controle como em um processo normal.

Caso a carta de controle indique que as medidas se encontram fora dos limites de controle ou algum outro tipo de variação tendenciosa seja detectada, deve-se

realizar uma análise para descobrir quais são as causas desses problemas, e atuar corretivamente na(s) causa(s) do mesmos, com a intenção de solucioná-los.

b) Determinação da tendência

Para determinar a tendência do instrumento de medição, para um ponto específico da faixa do processo, é necessário obter um valor de referência. A diferença entre o valor de referência e a média dos valores observados representa a tendência do instrumento de medição (ver item 4.2.2).

A avaliação do valor da tendência é baseada na sua porcentagem em relação à variação do processo (ou tolerância). Existem dois métodos de se obter o valor da tendência segundo [For95]:

- *Método da amostra independente*

1. Obter uma amostra e verificar seu valor de referência em relação a um padrão rastreável;
2. Um operador deve medir a amostra 10 vezes;
3. Calcular a média das medições;
4. Calcular a tendência através da subtração do valor de referência desta média;

$$\text{Tendência} = \text{Média dos valores medidos} - \text{Valor de referência}$$

$$\text{Variação do processo} = 6 \times \text{desvio padrão}$$

$$\text{Percentual da tendência} = \text{Tendência} / \text{Variação do Processo}$$

- *Método da Carta de Controle* (para o caso em que a estabilidade foi avaliada através de uma carta tipo média e amplitude (\bar{X} & R))

1. Obter uma amostra e verificar seu valor de referência em relação a um padrão rastreável;
2. Calcular $\bar{\bar{X}}$, com base nos dados da carta de controle;
3. Calcular a tendência através da subtração do valor de referência de $\bar{\bar{X}}$;

$$\text{Tendência} = \bar{\bar{X}} - \text{Valor de referência}$$

$$\text{Variação do processo} = 6 \times R$$

4. Percentual da tendência = Tendência / Variação do Processo

Deve-se avaliar a faixa do IT que o percentual da tendência encobre e, considerando-se a dispersão do processo de manufatura, pode-se determinar se o percentual da tendência é significativo ou não. Se o percentual da tendência for considerado significativo, deve-se procurar as possíveis causas e se tomar as providências necessárias.

Esses métodos avaliam a tendência do instrumento de medição somente na pequena faixa de medição correspondente ao valor nominal da amostra. Esse procedimento é aceito porque é exatamente essa pequena faixa de medição que será usada quando o instrumento de medição for aplicado para o controle geométrico.

c) Determinação da repetitividade e da reprodutibilidade

Estudo do instrumento de medição conhecido como “*Gage R&R*”¹¹, geralmente é executado de acordo com três métodos [For95]:

1. *Método da Amplitude;*
2. *Método da Média e da Amplitude;*
3. *Método da ANOVA (Análise de Variância).*

O *Método da Amplitude* somente propicia uma visão geral do comportamento do instrumento de medição, pois não decompõe as variações em repetitividade e reprodutibilidade. O método fornece um processo de cálculo para se obter a parcela da variação do processo (ou tolerância) que a variação das medições consome.

O *Método da Média e da Amplitude* fornece uma estimativa da repetitividade e da reprodutibilidade do instrumento de medição, mas não da interação entre ambos. Esse método pode ser baseado tanto em análises numéricas como em ferramentas gráficas que podem mostrar vários aspectos do comportamento do instrumento de medição.

¹¹ Avaliação do percentual do IT tomado pela repetitividade e pela reprodutibilidade.

O *Método da ANOVA* pode ser usado para o estudo dos erros do instrumento de medição e para outros tipos de variações das medições do instrumento em questão. A ANOVA (Análise de Variância), aplicada neste método, decompõe a variação dos resultados de medição obtidos em quatro categorias:

1. Variações devidas ao processo de manufatura;
2. Variações devidas ao operador;
3. Variações devidas ao instrumento de medição;
4. Interação entre mensurando e operador.

O *Método da Amplitude* e o *Método da Média e da Amplitude* não fornecem separadamente dados sobre variações que podem ser significativas no processo de medição. O conhecimento da influência de cada variação é importante na avaliação da qualidade do processo de medição [For95a]; portanto recomenda-se que a análise do *Gage R&R* seja baseada somente no *Método da ANOVA*.

Método da ANOVA

O método considera uma hipótese básica, que permite sua aplicação. Essa hipótese consiste na consideração de que os erros do instrumento de medição variam aleatoriamente e pertencem a uma distribuição normal. Além disso, deve-se observar que a coleta dos dados deve ser efetuada de forma aleatória, pois em caso contrário os resultados podem apresentar algum tipo de tendência.

A análise é executada com base em medições, com o instrumento a ser avaliado, de peças produzidas pelo processo de manufatura em que o instrumento será utilizado. Dessas peças se obtém o valor de referência através de medições realizadas com instrumento com um erro máximo bem menor (por exemplo: um décimo do erro máximo do instrumento a ser avaliado). A referência [For95] recomenda que sejam utilizadas 10 peças, que serão medidas por 3 operadores, realizando 3 medições em cada peça .

Uma análise prévia dos resultados obtidos nas medições pode ser feita através de um gráfico similar ao apresentado na Figura 9. Essa interpretação é baseada em uma análise qualitativa do paralelismo entre as linhas relativas a cada operador. A Figura 9

mostra linhas relativamente paralelas, significando que não há interação entre mensurando e operador. Quando as linhas não são paralelas a interação é significativa, sendo que quanto maior for o ângulo entre as linhas maior é a interação.

Um gráfico do tipo histograma, mostrando a distribuição de frequência do erro por operador que participa do estudo, propicia uma rápida visão de como o erro se distribui. Com isso, pode-se avaliar a existência de tendências pelas inconsistências nas medidas de cada operador.

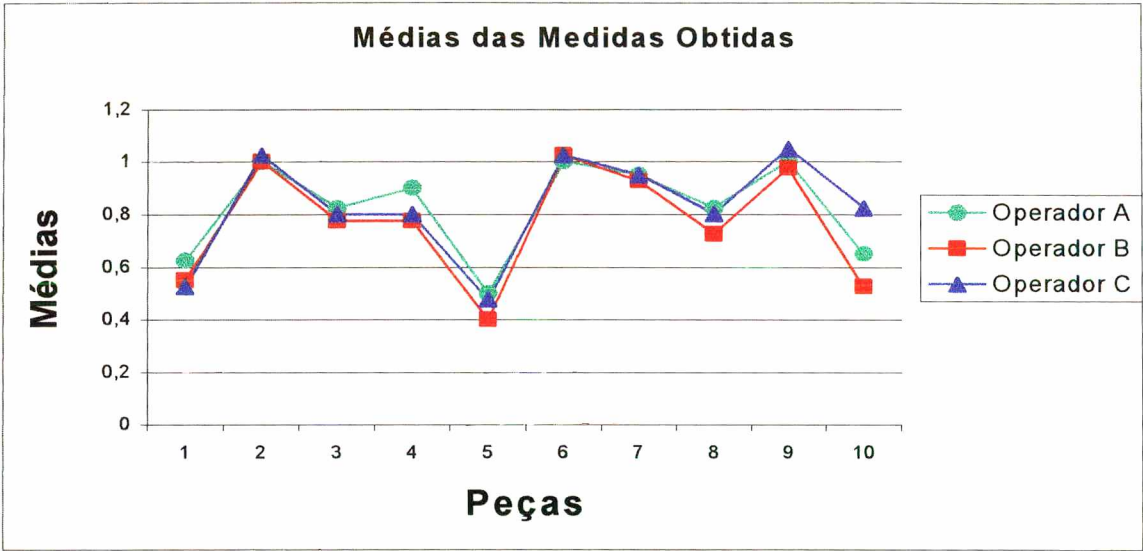


Figura 9 – Exemplo de gráfico das medidas por operador

Considerando que em um processo de manufatura as medições realizadas geram um resultado de medição, chamado de valor observado, as influências dos erros de medição sobre o valor observado podem ser representadas pela seguinte forma:

Valor Observado = Valor da Medida + Tendência + Efeitos do Processo +Efeitos do Operador + Erro de repetitividade

- *valor da medida* e a *tendência* são constantes, e podem ser estimados separadamente com o auxílio de um padrão, portanto não são de natureza randômica;
- *efeitos do processo* representam variações do processo de produção;
- *efeitos do operador* representam variações devidas a diferentes operadores, no MSA é considerado como sendo a reprodutibilidade;

- *erro de repetitividade* representa a variação resultante de repetidas medições, sob condições idênticas, por um mesmo operador;

Sendo y_{ijm} a *eméssima* medição realizada pelo operador j , na *iéssima* amostra, a variância dos fatores randômicos apresentados acima pode ser representada por:

$$\boxed{\text{VAR}(y_{ijm}) = \sigma^2 + \omega^2 + \alpha^2 + \gamma^2} \quad \text{Equação 25 – Variância dos fatores randômicos da medida}$$

onde: σ^2 : variância do valor da medida (devida ao processo de manufatura);

ω^2 : variância devido ao operador;

α^2 : variância da interação entre operador e peça;

γ^2 : variância das medidas (devido ao instrumento de medição);

Maiores informações sobre *Análise de Variância* podem ser encontrados em [Montgomery84, McCall170, Levin87]. Também maiores detalhes sobre o *Método da ANOVA* podem ser encontrados em [For95].

4.3 - A garantia da qualidade e o cálculo da incerteza de medição

O CEP se baseia em medições para auxiliar o controle de qualidade de peças produzidas por um processo de manufatura. A qualidade das medições pode ser avaliada com base no valor da incerteza dessas medições. Portanto o CEP está intimamente ligado ao cálculo da incerteza de medição, pois se as medições não representarem de forma fiel o que está ocorrendo com o processo de manufatura, todo controle sob o mesmo estará comprometido.

Este trabalho propõe que o conceito do CEP pode ser muito útil à garantia da qualidade no que diz respeito a medições; pois mantendo-se o valor da incerteza de medição sob controle estatístico, dentro de parâmetros considerados aceitáveis para o processo em questão, pode-se garantir a qualidade das medições.

Neste trabalho, como procedimento adicional, aconselha-se a execução da avaliação do instrumento de medição, visando qualificá-lo para o processo de medição,

conforme o método da **MSA** (item 4.2). No entanto, a aplicação desse método apenas pode dar um indicativo da qualificação do instrumento para controle geométrico de um determinado processo; e não fornecer parâmetros que quantificam a qualidade das medições realizadas com o referido instrumento. Ou seja: o método não permite o cálculo da incerteza de medição.

5. – Avaliação e Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição

5.1 - Considerações iniciais

De acordo com o exposto no item 2.4, existem duas situações onde o cálculo da incerteza de medição pode ser aplicado na indústria:

- a) cálculo da incerteza de medição no laboratório de metrologia da indústria;
- b) cálculo da incerteza de medição no processo de fabricação.

Na primeira situação, o cálculo da **IM** é executado com a intenção de obter-se o Erro Máximo Avaliado [FLESC99] do Instrumento quando da sua calibração. Considera-se que para essa situação, pelos motivos citados no item 2.4.1, os procedimentos adotados nas referências [Namas95, Eur96, Taylor94], todos baseados no *Guia*, são adequados para a aplicação nos Laboratórios de Metrologia da Indústria.

Na segunda situação, o cálculo da **IM** é executado com o objetivo de determinar o valor da incerteza dos resultados de medição de um instrumento de medição quando da sua utilização para controle geométrico. O valor da **IM** é utilizado, juntamente com o valor do intervalo de tolerância para que, através da relação **IT/IM**, se determine a aplicabilidade do instrumento de medição para o controle geométrico do processo de manufatura em questão.

Com base no exposto no parágrafo anterior, verifica-se a importância do cálculo da incerteza de medição no chão de fábrica, visando estabelecer um valor de

incerteza que, realmente, forneça um indicativo do nível da qualidade das medições.

No entanto, não é suficiente ter somente um indicativo da qualidade das medições. É necessário que seja possível monitorar esse nível de qualidade das medições ao longo do tempo. Propõe-se neste trabalho que esse nível de qualidade das medições possa ser monitorado através do controle estatístico do valor da incerteza expandida. Dessa forma pretende-se garantir que a qualidade das medições se mantenha, ao longo do tempo, em um nível considerado aceitável.

5.2 - Determinação da aplicabilidade de um instrumento para o processo de manufatura

5.2.1 - A capacidade de captar as variações do processo

Apesar de todo o aperfeiçoamento dos equipamentos e métodos de trabalho, não é possível evitar a ocorrência de uma série de variações no processo de produção. Não existem dois produtos ou duas características exatamente iguais; as diferenças sempre existem, embora as vezes seja difícil percebê-las.

É necessário que o instrumento de medição tenha capacidade de captar as variações do processo de manufatura ao qual está servindo de instrumento de controle geométrico. Se o instrumento de medição não é capaz de captar as variações no processo de manufatura não será possível utilizá-lo no controle do mesmo.

Para que seja possível verificar a capacidade de captar variações do processo, com um determinado instrumento de medição, recomenda-se a aplicação do método chamado Análise de Sistemas de Medição (MSA). Esse método, que está citado no item 4.2, tem como objetivo avaliar a qualidade do instrumento de medição ao qualificá-lo de acordo com sua capacidade de captar as variações do processo de manufatura.

5.2.2 - A confiabilidade na prova de conformidade

A grande maioria dos procedimentos de controle geométrico tem como finalidade básica avaliar a conformidade de uma determinada característica geométrica, de um produto manufaturado, em relação à especificação da mesma. Essa especificação geralmente possui um intervalo, dentro do qual a característica geométrica pode se encontrar sem prejudicar a função para qual foi projetada; esse intervalo chama-se Intervalo de Tolerância (IT).

A avaliação de conformidade do produto baseia-se no fato de o **RM**, obtido por meio de um instrumento de controle geométrico, encontrar-se ou não dentro do **IT**. O fato de que a avaliação de conformidade baseia-se em um **RM** e que toda medição possui uma incerteza, conduz à conclusão de que a **IM** deve ser considerada na prova de conformidade.

Uma norma específica para a prova de conformidade é a ISO 14253-1 [ISO 14253-1], na qual é definida como zona de conformidade: a zona de tolerância (ou **IT**) diminuída do valor da Incerteza Expandida (**U**) junto aos limites de controle. De acordo com a Figura 7 (página 30), pode-se notar que a zona de conformidade diminui à medida que o valor da incerteza expandida aumenta. A magnitude da relação **IM/IT** é muito importante para o processo produtivo, pois está intimamente ligada ao valor probabilístico de ocorrência de erros de classificação [Donatelli97].

A relação **IM/IT** deve ser definida com base nas particularidades do processo de fabricação. Conhecendo-se detalhes, tais como capacidade do processo e outros indicativos sobre o comportamento do processo produtivo ao longo do tempo, é possível avaliar-se os valores aceitáveis para a relação **IM/IT**. Neste trabalho não é abordado em detalhes esse assunto pois existem muitos fatores a serem avaliados no que diz respeito ao processo de fabricação, os quais extrapolam o objetivo deste trabalho.

O **IT**, que é definido na fase de projeto do produto, geralmente está relacionado com a interação entre os componentes do sistema projetado. Na maioria dos

casos, os projetos de peças mecânicas são executados sem uma maior preocupação com o instrumento de medição que irá controlar o processo de fabricação do produto [Bennich97]. Portanto a realidade da indústria mecânica mostra que a relação **IM/IT** desejada para um determinado processo de medição pode ser mais facilmente obtida através da utilização de meios de controle geométrico que propiciem um nível de **IM** que satisfaça a referida relação. Na maioria dos casos, é mais prático procura-se obter um determinado nível de incerteza na medição, do que alterar definições de projeto que regem os valores do **IT**. No entanto, esse fato não torna dispensável a preocupação com os meios de controle utilizáveis no processo de fabricação, quando da execução de um projeto de qualquer componente mecânico.

Para determinar se um instrumento de controle geométrico fornece medições com um nível de **IM**, nas condições estabelecidas, e que satisfaça a relação **IM/IT** desejada, recomenda-se a utilização do método **PUMA** (capítulo 3). O **PUMA**, através de um método iterativo, consegue determinar se as condições estabelecidas em um processo de controle geométrico podem fornecer medições que satisfaçam a relação **IM/IT** definida para o processo de manufatura em questão. Ou seja: este trabalho propõe que se utilize o **PUMA** para a seleção do instrumento de medição e para a definição dos parâmetros do processo de medição que garantam a obtenção de medições confiáveis.

5.3 - A garantia da obtenção de medições confiáveis através do **PUMA**

Conforme descrito no item 3.1, o **PUMA** estabelece um método que permite alcançar uma relação **IM/IT** que fornece uma abrangência da zona de conformidade que seja adequada ao processo de manufatura. Com base nas particularidades de cada processo de manufatura pode-se determinar qual é a fração máxima da zona de tolerância que a incerteza de medição pode abranger, estabelecendo-se a Incerteza Alvo (U_T) para o processo de controle geométrico.

Utilizando-se o **PUMA**, através do processo iterativo do cálculo da incerteza (item 3.1), pode-se definir quais os parâmetros necessários para que o resultado de medição possua uma determinada incerteza, chamada Incerteza Estimada (U_{EN}), que

permita que essa medição seja aplicada para o controle geométrico do processo.

Quando a Incerteza Estimada for menor ou igual à Incerteza Alvo, ou seja, ($U_{EN} \leq U_T$), pode-se dizer que o instrumento de controle geométrico fornece medições confiáveis, para o processo de manufatura nas condições estabelecidas. Para que esse processo de controle geométrico possa ser utilizado, deve-se garantir que o mesmo continue fornecendo medições confiáveis ao longo do tempo.

A ISO 9000 e a ISO 10012 são baseadas no controle de instrumentos através de calibrações. No entanto, de acordo com [Bennich97], a experiência com grande quantidade de cálculos de incerteza para instrumentos de controle geométrico mostra que, geralmente, as componentes de incerteza devidas ao próprio instrumento não são significativas. Outros componentes de incerteza, tais como: temperatura, estratégia de medição, desvios de forma, são dominantes na maioria dos casos.

Com base no exposto acima, acredita-se que através de um controle das componentes mais significativas da incerteza de medição seja possível garantir medições confiáveis. Ou seja: mantendo-se as grandezas de influência das componentes mais significativas da incerteza dentro de determinados limites, evita-se que a incerteza estimada (U_{EN}) ultrapasse a incerteza alvo (U_T).

No entanto, o instrumento de medição nunca deixará de ser um fator importante na composição da incerteza do processo de medição. Portanto, também é necessário que sejam executadas calibrações periódicas e zelar pela correta utilização do instrumento no processo de medição; ou seja: garantir que o mesmo esteja em conformidade com a norma ISO 9001 (item 4.11) [NBR ISO 9001:1994].

O estabelecimento da periodicidade das calibrações depende de características de cada procedimento de medição em particular. Técnicas aplicáveis estão propostas em [FLESC98, FLESC96, FLESC93, NBR 10012:1992].

Através dos resultados dessas calibrações periódicas obtém-se a componente de incerteza relativa ao instrumento de medição para o processo em questão. Se essa componente de incerteza for menor ou igual àquela utilizada no atual cálculo da incerteza do processo de medição, pode-se dizer que o instrumento continua fornecendo medições confiáveis para esse processo de medição. Caso contrário, ou seja: se a componente de incerteza obtida da calibração do instrumento for maior do que a utilizada no atual cálculo da incerteza do processo de medição, deve-se averiguar quais são as causas do problema e atuar corretivamente, visando manter a confiabilidade das medições.

5.4 – Controle da incerteza expandida no chão de fábrica

5.4.1 - O controle estatístico aplicado à garantia da qualidade das medições

Na grande maioria dos processos de manufatura, as peças produzidas são sujeitas a algum tipo de controle geométrico, que avalia uma determinada característica geométrica das peças produzidas. Com base nesse controle geométrico o CEP avalia o comportamento do processo de manufatura. Portanto pode-se dizer que quando os valores de uma determinada característica geométrica indicam que o processo está sob controle estatístico as peças produzidas possuem a qualidade dimensional desejada.

Em instrumentos de controle geométrico, o valor da incerteza de medição é geralmente dominado por um número reduzido de componentes. Neste trabalho considera-se que o valor da U_{EN} depende fortemente da magnitude dessas componentes mais significativas. Acredita-se que, aplicando o conceito de controle estatístico às grandezas físicas que geram essas componentes significativas da incerteza combinada, pode-se avaliar o comportamento das mesmas ao longo do tempo.

Mantendo-se o valor dessas grandezas sob controle estatístico, dentro de determinados limites que impeçam que a incerteza alvo seja extrapolada, propõe-se que se possa dizer que a qualidade das medições esteja garantida.

5.4.2 – Controle das componentes mais significativas da incerteza

Toda incerteza de medição possui várias componentes. Cada componente da incerteza de medição está relacionada com uma ou mais grandezas que possuem influência no processo de medição. Essas grandezas, chamadas de **Grandezas de Influência** [INMETRO95], representam alguma característica do equipamento de medição, do processo de manufatura ou ainda algum parâmetro externo que exerça influência no processo de medição. Essas grandezas de influência geralmente podem ser avaliadas ou medidas.

Para o processo de cálculo das componentes da incerteza de medição é necessário utilizar-se o desvio padrão das distribuições de frequência dessas grandezas. Por isso as mesmas são avaliadas para serem quantificadas (por meio de estimativas) ou medidas. Portanto pode-se concluir que se as grandezas de influência tiverem algum tipo de variação, o valor da componente de incerteza também irá variar.

Como pretende-se garantir o fornecimento de medições através do **Controle da Qualidade das Componentes mais Significativas da Incerteza**, deve-se estabelecer um controle sobre as grandezas de influência diretamente relacionadas com essas componentes. Esse controle deverá ser realizado através do estabelecimento de **Limites de Tolerância** para as grandezas de influência das componentes mais significativas.

Apesar de basear-se no conceito do CEP, que usa Limites de Controle, o **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** utilizará **Limites de Tolerância**. Conforme a Tabela 8 [Juran92], pode-se concluir que a principal diferença entre os dois tipos de limites está no fato de que os Limites de Controle são calculados a partir de dados do processo, e os Limites de Tolerância são determinados em função de valores que propiciem o bom funcionamento do produto.

A justificativa para utilizar-se **Limites de Tolerância** no lugar de Limites de Controle é que na análise das componentes mais significativas da incerteza de medição somente se tem valores que indicam qual é a faixa em que as mesmas devem se encontrar

para garantir que o parâmetro controlado (Incerteza Expandida) mantenha-se dentro dos padrões desejados. Para se usar Limites de Controle seria necessário ter valores que indicassem a variabilidade dessas grandezas.

Tabela 8 – Significado dos tipos de limite

Nome do limite	Significado
Limites de Tolerância	Estabelecidos pela função de projeto técnico para definir os valores mínimo e máximo permitidos para que o produto funcione de maneira apropriada.
Limites de Controle	Calculados a partir de dados do processo para definir os limites de variação acerca de um valor central.

Esses Limites de Tolerância (LT), a exemplo do CEP, devem servir como parâmetro de referência para o controle das componentes de incerteza, tornando possível detectar quando as mesmas assumirem valores que produzam uma incerteza estimada (U_{EN}) maior que incerteza alvo (U_T).

5.4.3 – Determinação dos limites de tolerância

A determinação desses LT (Limites de Tolerância), para cada grandeza de influência, deverá ser feita com base em como a mesma afeta o cálculo da incerteza de medição. Como os LT têm a função de estabelecer valores que evitem que a incerteza estimada (U_{EN}) ultrapasse a incerteza alvo (U_T), tem-se a seguinte condição básica:

$$U_{EN} \leq U_T$$

A incerteza estimada (U_{EN}), a exemplo da incerteza expandida (U), é obtida a partir a incerteza combinada, então da Equação 11 tem-se:

$$U_{EN} = k \times u_C$$

Equação 26 – Incerteza estimada

A incerteza alvo (U_T) pode ser considerada como um critério de seleção do processo de medição, para o controle geométrico em questão. Se o processo de medição não é capaz de propiciar a U_T desejada, o mesmo não poderá ser utilizado para o controle

geométrico do processo de fabricação. A definição da U_T se basear na Inequação 1 é o referencial de muitos sistemas de seleção de instrumentos de medição. Portanto:

$$\boxed{U_T = \frac{IT}{W}} \quad \text{Equação 27 – Incerteza alvo}$$

Onde: W valor numérico (geralmente de 3,5 a 10) que define fração do IT que é tomada pela incerteza de medição (ver item 5.2.2 e Figura 7).

Aplicando-se a Equação 26 e a Equação 27 a condição $U_{EN} \leq U_T$, tem-se:

$$\boxed{u_c \leq \frac{IT}{(k \times W)}} \quad \text{Inequação 2 – Incerteza combinada que garante medições confiáveis}$$

Substituindo-se na Inequação 2 o termo u_c pela Equação 6, pode-se obter a condição para determinação dos valores máximos e mínimos que uma grandeza de influência pode assumir sem que a U_T seja ultrapassada.

1 – Para o caso de grandezas de entrada não correlacionadas:

$$\boxed{\frac{IT}{(k \times W)} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)}} \quad \text{Inequação 3 – Determinação dos LT (grandezas não correlacionadas)}$$

2 – Para o caso de grandezas de entrada correlacionadas (Equação 8):

$$\boxed{\left[\frac{IT}{(k \times W)} \right]^2 \geq \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_j) u(x_i) r(x_i, x_j)}$$

Inequação 4 – Determinação dos LT (grandezas correlacionadas)

A determinação dos **LT**, para cada grandeza de influência, se dá pela resolução da Inequação 3 ou da Inequação 4. Para resolver a inequação substituem-se todas as variáveis pelos seus respectivos valores, exceto aquela que se quer determinar o **LT**. Com a resolução da inequação obtém-se um intervalo de valores que a componente de incerteza pode assumir sem comprometer a qualidade das medições.

O que se quer determinar são os valores dos LT para as grandezas físicas geradoras dessas componentes de incerteza. Para isso, utiliza-se a condição obtida da resolução da Inequação 3 ou da Inequação 4 aplicada à equação que determina a relação entre a grandeza de influência e a componente de incerteza. Essa equação é particular a cada caso e depende das premissas estabelecidas no cálculo da IM.

5.4.4 – Método de controle

Conforme o item 5.4.2, as grandezas de influência podem ser avaliadas e quantificadas. Através de medições periódicas dessas grandezas de influência, responsáveis pelas componentes de incerteza mais significativas, pode-se efetuar o **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição**.

A exemplo do CEP, a plotagem das medições das grandezas de influência em cartas de controle deve servir de orientação para a avaliação das mesmas. Como os LT tem a função de estabelecer valores dentro dos quais a U_{EN} não excede a U_T , pode-se dizer que os LT tem a mesma função dos limites de controle no CEP.

Como no caso do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** somente são controladas as medidas absolutas das grandezas de influência e não as amplitudes das mesmas, se pode dizer que o **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** é uma adaptação do CEP para as condições necessárias ao problema em questão. Neste procedimento se avaliam somente as variações sistemáticas das grandezas sob controle estatístico.

Através das medições periódicas das grandezas de influência e através da aplicação dos conceitos do CEP aos dados coletados, pode-se garantir que enquanto as grandezas de influência estiverem sob **Controle Estatístico** o processo de medição continuará a fornecer medições confiáveis.

Podem existir componentes de incerteza que não estão relacionadas com grandezas de influência que possuem características físicas. Essas componentes não podem

ser quantificadas por meio de simples medições. Para exercer o controle sobre a magnitude dessas componentes deve-se estabelecer métodos e/ou experimentos que, baseados no conhecimento específico acerca da referida componente, permitam avaliar a variabilidade das mesmas ao longo do tempo.

Um exemplo típico do caso de componentes que não possuem relação com grandezas físicas é a influência do operador no processo de medição. Para esse caso recomenda-se a utilização do **MSA** (item 4.2), através do *Método da ANOVA*, que permite a avaliação da variância da influência do operador sobre o processo de medição. Essa variância pode ser utilizada como parâmetro de controle para a componente de incerteza de medição devida ao operador.

Aplicando-se periodicamente o **MSA** obtêm-se dados sobre a influência do operador no processo de medição ao longo do tempo. Se a variância obtida for maior que a utilizada como componente de influência devido ao operador no cálculo da incerteza do processo de medição deve-se atuar corretivamente (por exemplo: através de treinamentos) visando manter as medições dentro dos padrões de qualidade desejados.

5.4.5 – Frequência de amostragem

As medições das grandezas de influência deve ser feitas por amostragem, ou seja, devem ter um periodicidade bem definida. Como a metodologia do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** pretende ser de âmbito genérico essa periodicidade deve ser adaptada a cada processo de medição e a cada grandeza de influência.

Aconselha-se que a frequência de amostragem seja determinada de acordo com o grau de conhecimento da distribuição de frequência adotada para a mesma. Ou seja: quanto menos conhecimento que se tem a respeito do comportamento de uma grandeza ao longo do tempo, maior deve ser a frequência de amostragem.

Além disso aconselha-se também que seja executado um acompanhamento contínuo do comportamento de cada grandeza de influência, para que com base nesse comportamento seja possível um ajuste da frequência de amostragem. Esse ajuste deve reger-se pela magnitude da variação da grandeza de influência ao longo do período de amostragem.

Essa informação a respeito do comportamento das grandezas de influência pode servir de fonte de informação para ratificar e/ou retificar o processo de cálculo da IM.

6. – Exemplo de Aplicação do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza

Para exemplificar a metodologia proposta no capítulo 5, a mesma foi avaliada em cálculo de **IM** no chão de fábrica. O estudo foi realizado sobre o diâmetro interno de peças de alumínio injetado, Figura 10, com valor nominal de 64 mm, usinadas em centro de usinagem CNC com ferramenta móvel. A especificação de diâmetro define um intervalo de tolerância de 80 μm .

Cabe salientar que os dados utilizados neste exemplo foram retirados de um processo de medição usado para o controle geométrico de um lote de peças produzidas no **CMPJ – Centro de Mecânica de Precisão de Joinville**. As considerações feitas em virtude da aplicação da metodologia proposta são ilustrativas e servem somente para mostrar a idéia de funcionamento do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza**.

A aplicação da metodologia está dividida em duas etapas:

1. Seleção do processo de medição adequado;
2. Parâmetros do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza.

6.1 – Seleção do processo de medição adequado

O instrumento deve ser aplicado à peça uma única vez, em posição não determinada por procedimentos específicos. Tanto a fabricação como a avaliação de conformidade com a especificação de diâmetro se realizam em ambiente climatizado.

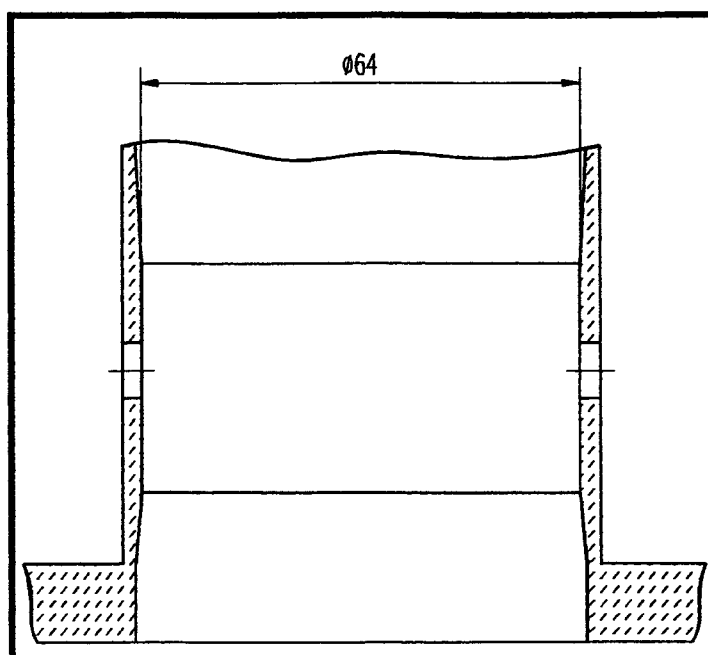


Figura 10 – Peça objeto do estudo

6.1.1 – Aplicação do PUMA

O sistema de medição que se pretende utilizar para o controle das peças produzidas é um relógio comparador analógico (valor de uma divisão igual a 1 μm), acoplado em um medidor de internos. Conforme recomendado no item 5.3, deve-se executar o cálculo da incerteza de medição através do **PUMA** para determinar se o processo de medição atende ao nível de qualidade requerida pelas especificações do produto. É necessário definir, primeiramente, a tarefa de medição e a incerteza alvo:

1. *Tarefa de medição*: diâmetro interno de uma peça de alumínio injetado com valor nominal de 64 mm e especificação de tolerância (+0,000 a +0,080) μm (**IT** = 80 μm);

2. *Incerteza alvo*: de acordo com a Equação 27:
$$U_T = \frac{IT}{W}$$

Onde, de acordo com a tarefa de medição, temos: **IT** = 80 μm ;

Com base em 64 medições do diâmetro da peça, executadas em laboratório de metrologia, com o intuito de calcular os desvios de forma existentes, encontrou-se uma gama de valores na faixa entre 64,020 mm e 64,035 mm. Considerando essas medições como uma amostragem do valor do mensurando, para o processo de medição em questão

pode-se dizer que se a incerteza do processo de medição consumir menos de 25% do IT (na faixa entre 64,000 mm a 64,080 mm) o risco de erro na classificação de conformidade da diâmetro da peça será muito pequeno [WECKENMANN98]. Um risco de erro de classificação pequeno significa que o processo de medição pode ser considerado de boa qualidade para o controle geométrico em questão.

De acordo com o exposto acima, e baseando-se nas condições específicas desse processo produtivo, que é realizado em um ambiente controlado, pode-se assumir que $W = 4$, Figura 11.

$$\text{Portanto: } U_T = \frac{IT}{W} = \frac{80}{4} = 20 \Rightarrow \pm 10 \mu\text{m}$$

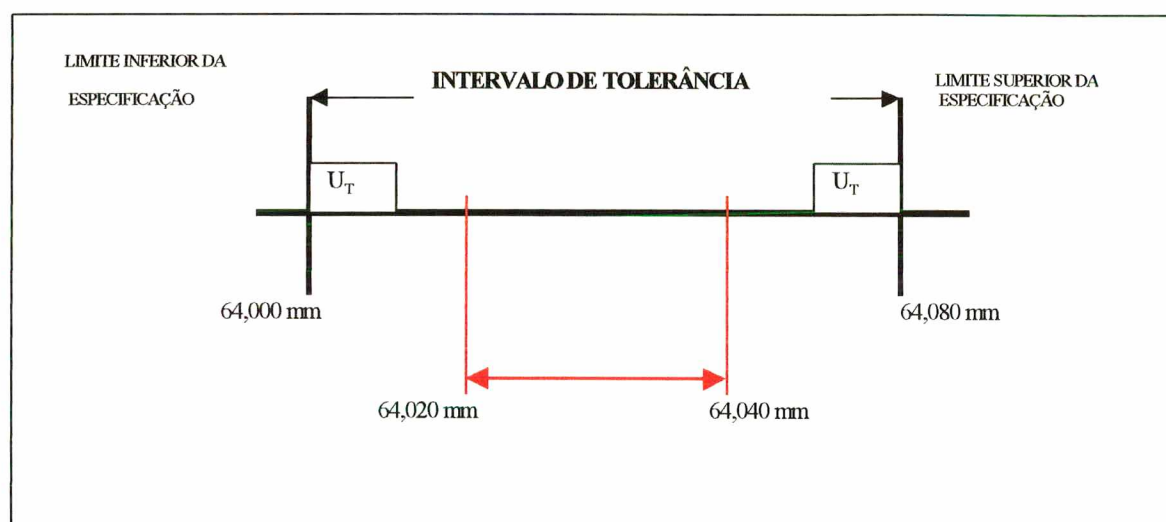


Figura 11 – A Incerteza Alvo em relação ao Intervalo de Tolerância

Para primeira estimativa, utilizou-se o valor do erro máximo permissível segundo norma NBR [NBR 10125:1987]. Os efeitos da temperatura do mensurando e do instrumento de medição são considerados correlacionados; a ISO/TR 14253-2 recomenda que o coeficiente de correlação deve ser estimado somente pelos valores 1, 0 ou -1, sendo então utilizado o valor -1 que corresponde a uma correlação inversa completa. Considerou-se que a diferença de temperatura entre a peça e o instrumento pode variar no máximo 1,0 °C. A contribuição dos desvios de forma foi obtida com base na ANOVA realizada sobre os resultados de medições do diâmetro, realizadas em laboratório, de um lote de dez peças [Liska97].

Tabela 9 – Definições para cálculo da incerteza

Item	Definições	
①	Tarefa de medição	Medição de um diâmetro D = 64 mm
②	Incerteza alvo	$U_T = \pm 10,0 \mu\text{m}$
③	Princípio de medição	Medição mecânica e diferencial do diâmetro através de um relógio comparador analógico
④	Método de medição	Medição diferencial do comprimento Indicação analógica
⑤	Procedimento de medição	Simples medição - Arredondamento da leitura de acordo com a resolução
⑥	Condições de medição $\Delta T_x = T_x - 20 \text{ }^\circ\text{C}$	Material do mensurando: alumínio $\Delta T_p = \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$ considerado com distribuição retangular Material do instrumento de medição: aço $\Delta T_i = \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$ considerado com distribuição retangular

Tabela 10 – Primeira estimativa da incerteza

Símbolo	Tipo de Incerteza	Valor [±]	Distribuição de Probabilidade	Divisor	c_i	$u_i(D)$ [±]	v_i ou v_{eff}
U(emp)	Erro Máx. Permis.	5,0 μm	Retangular	$\sqrt{3}$	1	2,9 μm	∞
U(ΔL_p)	Influência Temp. Peça	2,5 $^\circ\text{C}$	Retangular	$\sqrt{3}$	1,60 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	2,3 μm	∞
U(ΔL_i)	Infl. Temp. Instr.	2,5 $^\circ\text{C}$	Retangular	$\sqrt{3}$	0,74 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	1,1 μm	∞
U(ΔDifT)	Dif. Temp Peça/Instr.	0,5 $^\circ\text{C}$	Retangular	$\sqrt{3}$	0,86 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	0,25 μm	∞
U(DF)	Desvio de Forma	6,6 μm	Normal	2	1	3,3 μm	64
Observação: $u_c(D) = \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [u(\Delta L_p)]^2 + [u(\Delta L_i)]^2 + [u(\Delta \text{DifT})]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times u(\Delta L_p) \times (u(\Delta L_i)) \times r}$ Coeficiente de correlação: $r = -1$							
$u_c(D)$	Incerteza Combinada		Normal			4,56 μm	247
U	Incerteza Expandida		Normal (k=2)			9,1 μm	247

$U_T = \pm 10,0 \mu\text{m} > U_{E1} = \pm 9,1 \mu\text{m}$

Na primeira estimativa da incerteza U_{EI} , **Tabela 10**, a condição de fornecimento de medições confiáveis é obtida. Portanto pode-se dizer que esse processo de medição pode fornecer medições confiáveis, permitindo que o mesmo seja utilizado como meio de controle geométrico do diâmetro interno da peça.

O procedimento de cálculo da **IM** executado acima não possui uma avaliação completa de todas as componentes de incerteza possíveis para esse processo de medição. No entanto, o mesmo pode servir de orientação para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho porque possui estimativas das componentes que se imagina serem as mais significativas num processo de medição desse tipo.

Com base no exposto acima, aplicou-se a metodologia do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** com o intuito de demonstrar somente o funcionamento prático da mesma. Exclui-se a possibilidade de, com base nos dados desse exemplo, validar a metodologia.

6.2 - Parâmetros do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza

6.2.1 - Percentual de contribuição das componentes mais significativas

Conforme o descrito no item 5.4.2, o **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** deve ser feito por meio do controle das componentes mais significativas da **IM**. Portanto é necessário definir-se quais são as componentes mais significativas da **IM** no processo de medição em estudo.

Entende-se por componente mais significativa aquela que possui o maior percentual de contribuição para o valor final da incerteza combinada. Como a U_T é obtida através de uma soma quadrática, o percentual de contribuição de cada componente da **IM** é calculado baseando-se nos valores de cada incerteza padrão, u_i , elevada ao quadrado, em relação ao quadrado da incerteza combinada, u_c .

Para o processo de medição que é objeto de estudo neste trabalho, as componentes mais significativas são o Erro Máximo Permissível e os desvios de forma, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Definição das componentes mais significativas

Fontes	$u_i(D)$ [±]	$(u_i)^2$	%
Erro Máximo Permissível	2,9 μm	8,41	40,4 %
Influência da Temperatura da Peça	2,3 μm	5,29	25,4 %
Influência da Temperatura do Instrumento	1,1 μm	1,21	5,81 %
Dif. da Temperatura da Peça e do Instrumento	0,25 μm	0,0625	0,3 %
Desvio de Forma	3,3 μm	10,89	52,3 %
Correlação da Temp. da Peça e do Instr.		-5,06	- 24,2 %
$u_c(D)$	3,7 μm	20,79	100 %

Embora a influência da temperatura da peça pareça ser significativa, a mesma é correlacionada com a influência da temperatura do instrumento. Essa correlação é negativa, e por consequência praticamente anula a influência da temperatura da peça sobre a incerteza do processo de medição.

6.2.2 – Determinação dos limites de tolerância (LT)

A determinação dos LT segue o equacionamento descrito no item 5.4.3, onde relaciona-se a incerteza combinada, u_c , com o intervalo de tolerância (IT), com o fator de abrangência (**k**) e com o denominador utilizado para seleção de instrumentos de medição (**W**). Portanto, temos:

Tabela 12 – Dados para determinação dos LT

Dados para Cálculo dos LT			
IT	W	k	u_c
±40 μm	4	2	Equação da Tabela 10

Nesse caso a determinação dos **LT** é baseada na Inequação 4, pois tem-se componentes de incerteza correlacionadas. Existem duas componentes consideradas de significativa influência no valor da **IM**, que são o “Erro Máximo Permissível” e o “Desvio de Forma”, Tabela 11.

Considerando que, exceto o Erro Máximo Permissível, todas as outras grandezas que influem no valor da incerteza combinada permaneçam constantes, pode-se calcular o intervalo de valores que o Erro Máximo Permissível pode assumir sem que a incerteza calculada torne-se maior que a incerteza alvo. O cálculo pode ser realizado utilizando-se a Inequação 4 onde substitui-se todas as variáveis, exceto aquelas relacionadas com o Erro Máximo Permissível:

$$\left[\frac{IT}{(k \times W)} \right]^2 \geq \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (\text{Inequação 4})$$

- Substituindo-se a segunda parte da Inequação 4 pelo equivalente termo utilizado para o cálculo da u_c no **PUMA**, Tabela 10, tem-se:

$$\left[\frac{IT}{k \times W} \right] \geq \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [u(\Delta Lp)]^2 + [u(\Delta Li)]^2 + [u(\Delta DifT)]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times u(\Delta Lp) \times (u(\Delta Li)) \times r}$$

$$\left[\frac{\pm 40}{2 \times 4} \right] \geq \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [2,3]^2 + [1,1]^2 + [0,25]^2 + [3,3]^2 + 2 \times 2,3 \times 1,1 \times -1}$$

$$(5)^2 \geq 12,39 + [u(\text{emp})]^2$$

$$u(\text{emp}) \leq 3,55 \text{ } \mu\text{m}.$$

Semelhantes considerações as feitas para o Erro Máximo Permissível, podem ser feitas para os desvios de forma. As equações básicas para a determinação dos **LT** são as mesmas. No entanto, para calcular-se os **LT** para os desvios de forma deve-se considerar que todas as outras grandezas de influência permanecem inalteradas. De acordo com a seqüência estabelecida no cálculo acima:

$$\left[\frac{IT}{k \times W} \right] \geq \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [u(\Delta Lp)]^2 + [u(\Delta Li)]^2 + [u(\Delta DifT)]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times u(\Delta Lp) \times (u(\Delta Li)) \times r}$$

$$\left[\frac{\pm 40}{2 \times 4} \right] \geq \sqrt{[2,9]^2 + [2,3]^2 + [1,1]^2 + [0,25]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times 2,3 \times 1,1 \times -1}$$

$$(5)^2 \geq 9,87 + [u(DF)]^2$$

$$u(DF) \leq 3,89 \text{ } \mu\text{m}.$$

No primeiro momento, efetuou-se o cálculo para estabelecer qual é a variação individual para cada componente de incerteza escolhida que faz com que a U_E ultrapasse o valor da U_T . Neste próximo passo, será avaliada a variação simultânea das duas componentes mais significativas de incerteza. A equação necessária é a mesma utilizada nos cálculos anteriores; a única diferença é que agora tem-se duas variáveis na mesma equação.

$$\left[\frac{IT}{k \times W} \right] \geq \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [u(\Delta L_p)]^2 + [u(\Delta L_i)]^2 + [u(\Delta \text{DifT})]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times u(\Delta L_p) \times (u(\Delta L_i)) \times r}$$

$$\left[\frac{\pm 40}{2 \times 4} \right] \geq \sqrt{[u(\text{emp})]^2 + [2,3]^2 + [1,1]^2 + [0,25]^2 + [u(DF)]^2 + 2 \times 2,3 \times 1,1 \times -1}$$

$$25 \geq [u(\text{emp})]^2 + [u(DF)]^2 + 1,50$$

Como tem-se duas variáveis e somente uma equação, os valores que satisfazem a desigualdade serão determinados por meio de uma planilha de cálculo utilizando como faixa de valores para cada variável os intervalos determinados nos cálculos individuais de cada componente de incerteza. Assim, serão calculados todos os valores de U_E quando $u(DF)$ varia de (0 até 3,9) μm (com variação de 0,1 μm) para cada variação de $u(\text{emp})$ entre (0 até 3,5) μm (com variação de 0,1 μm).

Analisando a planilha, conclui-se que os valores que em conjunto não resultam em uma incerteza de medição maior do que a incerteza alvo são:

$$u(DF) \leq 3,8 \mu\text{m}$$

$$u(\text{emp}) \leq 3,0 \mu\text{m}$$

Com esses dados, pode-se calcular os Limites de Tolerância para cada grandeza física que se relaciona com as componentes mais significativas da incerteza:

a) Erro Máximo Permissível

$$u(\text{emp}) = \frac{c_i \times \text{em}}{\sqrt{3}} \quad c_i = 1,0$$

$$\frac{c_i \times \text{emp}}{\sqrt{3}} \leq 3,0 \mu\text{m} \quad \text{emp} \leq 5,2 \mu\text{m}$$

Portanto:

Limite de Tolerância Inferior para o Erro Máximo Permissível: $LTI_{emp} = 0 \mu m$;

Limite de Tolerância Superior para o Erro Máximo Permissível: $LTS_{emp} = 5,2 \mu m$;

b) LT do Desvio de Forma

$$u(DF) = \frac{c_i \times DF}{2} \quad c_i = 1$$

$$\frac{c_i \times DF}{2} \leq 3,8 \mu m \quad DF \leq 7,6 \mu m$$

Portanto:

Limite de Tolerância Inferior para o Desvio de Forma: $LTI_{DF} = 0 \mu m$;

Limite de Tolerância Superior para o Desvio de Forma: $LTS_{DF} = 7,6 \mu m$;

6.2.3 – Considerações sobre as medições das grandezas de influência

A escolha do instrumento que executará as medições das grandezas de influência é baseada no mesmo princípio que capacita o processo de medição em questão para executar o controle geométrico, ou seja, a relação IM/IT. Portanto, a situação ideal para a seleção do processo de medição para controle estatístico das componentes mais significativas é aquela onde se aplica todo o procedimento de **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição**.

Nesse exemplo não será executado todo o processo novamente. Para minimizar as possibilidades de erros de classificação quando do controle das grandezas físicas (Erro Máximo Permissível e Desvio de Forma), serão escolhidos instrumentos de medição com uma IM muitas vezes menor do que cada respectivo IT, fazendo com que a IM consuma o mínimo possível do IT e proporcione uma medição confiável.

a) Erro Máximo Permissível

O Erro Máximo Permissível deve ser controlado com base nos resultados obtidos quando da calibração do instrumento de medição. O procedimento de calibração deve estar devidamente embasado em conceitos metrologicamente corretos e aprovados pela RBC.

b) Desvios de Forma

Os desvios de forma podem ser avaliados por meio da utilização de um circularímetro. Conforme definido no item anterior os desvios de forma da peça deve estar entre 0 μm e 7,6 μm , para que a confiabilidade das medições seja mantida. Portanto o intervalo de 7,6 μm , pode ser comparado com um IT (intervalo de tolerância), dentro do qual os desvios de forma podem variar. Aplicando uma relação IM/IT que possa garantir um alto grau de confiabilidade para as medições, teremos:

Incerteza da Medição de Temperatura \leq (intervalo de controle da temperatura)/5, então:

$$U_{\text{TCirc.}} \leq 1,52 \Rightarrow \pm 0,76 \mu\text{m}.$$

Deve-se escolher instrumentos de medição com as incertezas especificadas acima para garantir que a influência da mesma seja insignificante no processo de decisão de conformidade em relação às especificações dos LT.

6.2.4 - Frequência de amostragem

A determinação inicial da frequência de amostragem se dá com base em conhecimentos empíricos do processo e/ou no bom senso. Após a elaboração das primeiras cartas de controle se pode, com base na estabilidade das medidas, aumentar ou diminuir a frequência estabelecida.

O ajuste da frequência de amostragem é baseada na variabilidade apresentada pela grandeza medida. No caso de se ter uma grande variabilidade, ou algum tipo de tendência, deve-se aumentar a frequência de amostragem e buscar detectar a causa da variabilidade, visando minimizar a mesma. Quando a variabilidade das medidas for pequena pode-se diminuir a frequência de amostragem.

Nesse exemplo, foram escolhidas arbitrariamente as frequências de amostragem para as duas grandezas físicas. Essa escolha baseou-se no conhecimento das características específicas do processo produtivo e do ambiente onde se realiza o mesmo.

a) Erro Máximo Permissível

Neste trabalho recomenda-se executar calibrações com uma periodicidade de seis meses. Acredita-se que durante esse período de utilização o principal possível causador de alguma alteração na qualidade das medições do referido instrumento deverá ser o desgaste mecânico dos componentes do mesmo. Portanto, calibrações semestrais poderão detectar indícios de deterioração da qualidade das medições antes que as mesmas comprometam a qualidade do processo de medição como um todo.

b) Desvios de forma

Os desvios de forma dependem muito do processo produtivo [Chan96], portanto a definição da frequência de amostragem para os desvios de forma deve se basear no conhecimento do processo de fabricação da peça. O processo produtivo da peça em questão utiliza uma estrutura para fixar 16 peças e usiná-las em sequência. Nesse caso, pode-se considerar que o processo produtivo apresenta as mesmas condições para essas 16 peças. Portanto recomenda-se que sejam executadas avaliações de circularidade de, ao menos, uma peça para cada lote de 16 peças, escolhida aleatoriamente do lote que estiver sendo produzido no momento da retirada da peça.

7. – Conclusões

7.1 – Aplicabilidade da metodologia

A metodologia visa a manutenção da incerteza do processo de medição dentro da condição de conformidade com a incerteza alvo (U_T). A aplicação do Procedimento para Gerenciamento da Incerteza (**PUMA**) destina-se a determinar se o processo de medição é capaz ou não de cumprir com essa condição de conformidade. Portanto, dentro do contexto da metodologia, a aplicação do **PUMA** (Procedimento para Gerenciamento da Incerteza) pode ser vista como um mecanismo de seleção do instrumento de medição e dos parâmetros envolvidos no processo controle geométrico.

A metodologia foi elaborada voltada para os conceitos da metrologia dimensional. Nos outros campos da metrologia, tais como: medição de massa e medições de grandezas elétricas, o conceito do **PUMA** aparentemente pode ser aplicado sem maiores restrições. No entanto, os conceitos da **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** devem ser melhor analisados para verificar se os mesmos são aplicáveis ou não para cada tipo de grandeza a ser medida. No capítulo 5, onde a proposta deste trabalho é descrita, é citado que a situação ideal para o controle das componentes mais significativas da incerteza é aquela em que a metodologia também é utilizada para avaliar a qualidade das medições de cada grandeza física que seja geradora de uma componente significativa da incerteza. Foge dos objetivos deste trabalho avaliar se a referida metodologia enquadra-se perfeitamente para cada tipo de grandeza física. Portanto, da forma como a mesma é apresentada, somente pode-se afirmar que sua aplicação está aparentemente adequada para o campo do controle geométrico.

Dentro da área de controle geométrico, entende-se que a metodologia é útil para aplicações em processos que possuem intervalos de tolerância estreitos. Ou seja: casos

em que o intervalo de tolerância possui uma magnitude tal que justifique a adoção de estratégias para controle da incerteza de medição (**IM**) ao invés da simples aplicação de processos de controle geométrico mais exatos sem onerar o processo de medição.

O tempo gasto para o estudo e cálculo da **IM** (incerteza de medição) deve ser compensado pelo ganho gerado com a prevenção de erros de classificação. O número de peças que poderiam sofrer erros de classificação e gerar custos adicionais ao processo é proporcional ao número de peças produzidas. Portanto, a adoção dessas estratégias de controle da **IM** somente se justificam em processos de produção de lotes grandes de peças ou em casos onde o processo de medição é um fator crítico. Para processos onde as características influentes na **IM** são bastante estáveis, a metodologia também pode ser aplicada, desde que as frequências de amostragem para essas grandezas de influência sejam devidamente ajustadas de acordo com o nível de estabilidade de cada uma.

7.2 – Funcionalidade da metodologia

A avaliação da metodologia de **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** é dividida em duas etapas:

- a) Seleção do processo de medição adequado (avaliada com base no exemplo de utilização do **PUMA** apresentado no capítulo 3);
- b) Parâmetros do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** (avaliada com base no exemplo de aplicação que é apresentado no capítulo 6);

7.2.1 – Avaliação da etapa de seleção do processo de medição adequado

Através do item 3.4 (onde é mostrado um exemplo de utilização do **PUMA**) é possível fazer uma avaliação da metodologia proposta no que diz respeito ao processo de seleção do instrumento de medição. Com base no exemplo de utilização, pode-se avaliar o **PUMA** como sendo uma importante ferramenta para determinar se o processo de medição escolhido é adequado ao processo de manufatura em questão.

O exemplo mostra a avaliação do processo de medição, que deverá executar o controle geométrico do processo de manufatura cumprindo-se os requisitos de qualidade das medições. No exemplo, determina-se a incerteza alvo U_T , com base na relação de **IM/IT** desejada, e após aplica-se o **PUMA** para se estabelecer quais são os valores que permitem que se cumpra a premissa estabelecida pela U_T .

Com todo esse processo, conseguiu-se demonstrar que através de um simples processo iterativo é possível determinar se o instrumento de medição serve para o processo de controle geométrico e se os parâmetros do processo de medição são adequados ao nível de qualidade desejado para as medições.

7.2.2 – Análise crítica da determinação dos parâmetros do Controle Estatístico das Componentes da Incerteza

Essa análise ficou prejudicada devido ao fato de que o exemplo utilizado para a aplicação da mesma não foi devidamente aplicado e testado em aplicações reais. A avaliação baseada num exemplo se refere somente à idéia de se usar o controle estatístico para garantir a qualidade das medições ao longo do tempo. Não se pretende validar a metodologia por meio do exemplo apresentado.

O método de **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** possui quatro etapas, que determinam os parâmetros para a aplicação do método. As referidas etapas são analisadas abaixo.

a) Determinação das componentes mais significativas

O método de determinação das componentes mais significativas da **IM**, exposto no item 6.2.1, se baseia no percentual de contribuição da cada incerteza combinada para a formação da incerteza expandida (U). Baseando-se na teoria da Análise de Pareto¹², que diz que poucas causas são responsáveis pela maioria dos problemas [Campos92], pode-se dizer que eleger para controle algumas componentes (*causas*) que possuem um percentual

¹² Método que auxilia a classificação e priorização de problemas.

de contribuição elevado para a incerteza expandida (*problema*) deverá ser o suficiente para garantir que as medições mantenham-se dentro dos níveis de qualidade desejados.

b) Determinação dos limites de tolerância

A determinação dos Limites de Tolerância (LT), para cada componente, é baseada na equação da incerteza combinada. A resolução da equação (ver item 6.2.2) fornece um intervalo de valores que a grandeza física em estudo pode assumir sem que a incerteza expandida extrapole o valor pré-definido pela incerteza alvo. Esse procedimento é executado para cada uma das componentes mais significativas da U (incerteza expandida); em cada caso considera-se que as outras componentes permanecem constantes (com os valores estipulados no cálculo da U). Após, se utilizam esses valores para que, empiricamente (por meio de uma planilha de cálculo), se estabeleçam os LT (Limites de Tolerância) das duas grandezas que satisfazem a condição de que a incerteza alvo deve ser menor que a incerteza estimada ($U_T \geq U_E$).

É recomendável que se eleja o menor número possível de componentes de incerteza para o **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza**, visando facilitar a execução do controle estatístico.

Outro fato que se verificou no decorrer das análises matemáticas é que se as componentes mais significativas da incerteza de medição possuírem correlação com alguma outra componente, a avaliação das mesmas, bem como a determinação dos LT ficam dificultadas. Portanto, se sugere que, sempre que possível, as considerações para a execução do cálculo da incerteza do processo de medição sejam feitas evitando se ter grandezas correlacionadas.

c) As medições das grandezas de influência

O item 6.2.3 recomenda que os instrumentos de medição que serão utilizados para o controle das grandezas de influência devem ter uma relação entre a IM e o LT que também garanta medições confiáveis para o controle das grandezas de influência. Toda avaliação deverá seguir os critérios da *Seleção do processo de medição adequado*, descrito no item 6.1; dessa forma também garante-se a confiabilidade das medições.

O tamanho das amostras ou a quantidade de medições que serão efetuadas para o controle das grandezas de influência são determinadas de acordo com o conhecimento prévio da

variabilidade dessas grandezas e nas condições específicas de cada processo. Esse procedimento pode ser aceito dessa forma porque:

- a variabilidade de cada grandeza física é determinante na avaliação do tamanho da amostra em qualquer processo estatístico;
- é necessário analisar-se em cada caso as condições que se tem de executar-se medições paralelas ao processo, pois medições para **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza do Processo de Medição** não podem interferir no bom andamento do processo de produção.

d) **Frequência de amostragem**

A determinação da frequência de amostragem também é baseada nas premissas do Controle Estatístico de Processo (**CEP**). Acredita-se que as medições periódicas das amostras permitem uma avaliação da variabilidade das mesmas. Sendo assim, a própria magnitude dessa variabilidade será usada como fator regulador da frequência de amostragem. Esse mesmo método é utilizado no **CEP** (Controle Estatístico de Processo), portanto essa proposta de ajuste da frequência de amostragem com base na variabilidade das medições está fundamentado em um conceito já comprovado.

7.3 – Propostas para trabalhos futuros

A seguir apresentam-se propostas de temas que poderão ser abordados em trabalhos futuros. As propostas são baseadas em assuntos que poderiam complementar ou incrementar o presente trabalho e não puderam ser abordados no mesmo.

- Análise e classificação dos parâmetros que influenciam significativamente na incerteza de medição em processos de fabricação que envolvam controle geométrico, visando determinar as implicações da utilização do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** em cada tipo de processo de fabricação;
- Aplicação da metodologia do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza**, ao longo do tempo, em um processo de controle geométrico de uma peça manufaturada, considerando todas as influências conhecidas sobre a incerteza do processo de medição;

- Estudo para quantificar a redução dos erros de classificação que a aplicação do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** pode propiciar ao processo de controle geométrico;
- Avaliação matemática da influência, na classificação de conformidade, das incertezas dos processos de medição utilizados para controlar as grandezas de influência das componentes mais significativas da incerteza expandida;
- Determinação dos tipos de lotes de produção (incluindo quantidades de peças, intervalos de tolerância e outros fatores) que podem ganhar rentabilidade econômica com a aplicação do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza**;
- Estudo da possível aplicação do **Controle Estatístico das Componentes da Incerteza** em outros campos da metrologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[BARP98]

Barp, A., Flesch, C. A. **Avaliação da incerteza de medição durante o projeto de cadeias de medição**. III SEMETRO – Seminário Internacional de Metrologia Elétrica; Rio de Janeiro, RJ, 15 a 17/09/1998; Anais em CD-ROM.

[Bennich97]

Bennich, P. **Dimensional Quality Control an Quality Management in Manufacturing Companies**. Seminário Internacional de Metrologia (SI - MpCQ - 97), Fundação CERTI, Florianópolis, 1997.

[BIPM93]

BIPM, IEC, IFCC, ISSO, IUPAC, OIML. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, International for Standardization, Geneva, Switzerland, First edition, 1993.

[Campos92]

Campos, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**, Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Rio de Janeiro, Bloch Ed., 1992.

[CERTI97]

CERTI, Fundação. **PA-028 – Procedimento Geral para Determinação de Incertezas de Medição**, Procedimento Administrativo, revisão 00, 1997.

[Chan96]

Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J. **The influence of sampling strategy on circular feature in coordinate measurements**. Measurement 19, p.73-81, 1996.

[CMCQ97]

CMCQ - Centro de Metrologia e Controle de Qualidade, Visita ao Laboratório de Metrologia Dimensional, Fundação CERTI - Florianópolis - SC, 1997.

[Dietzsch96]

Dietzsch, M. **Calculation of the expanded uncertainty according to the Commette Draft (CD) ISO/TR 14253-2**, Apostila de Curso, Fundação CERTI - Florianópolis, 1996.

[Donatelli97]

Donatelli, G.D., Schneider, C.A. **Optimisation of Dimensional Quality Control: a Simulation Approach**. Seminário Internacional de Metrologia para Controle de Qualidade (SI – MpCQ - 97], Fundação CERTI, Florianópolis, 1997.

[Duncan65]

Duncan, A. J. **Quality Control and Industrial Statistic**, Homewood, Illinois, Richard D. Irwin Inc., 1965.

[EMBRACO97]

EMBRACO – Empresa Brasileira de Compressores S.A., Visita à fábrica em Joinville - SC, 1997.

[Eur96]

European Cooperation for Accreditation of Laboratories. **EAL-R2 - Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration**, 1996.

[FLESCH93]

Flesch, C. A., França, L. R. G. **Sistema de gerenciamento de instrumentos de controle geométrico: caracterização e desenvolvimento de um protótipo**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; Brasília, DF, 12/1993; Anais, v.3, p 1551 – 1554.

[FLESCH95]

Flesch, C. A., Galaz, M. J. **Determinação da função beta e sua aplicação na metrologia**. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; Belo Horizonte, MG, 12/1995; Anais.

[FLESCH96]

Flesch, C. A., Camarano, D. M. **Intervalo de calibracion de termopares, termoresistencias y termistores**. Revista Internacional Informacion Tecnologica, ISSN 0716-8756. Vol.7, nº 2, 1996, p 177 –184.

[FLESCH98]

Flesch, C. A., Scavone, R. **Aplicación de sistemas expertos para determinar intervalos de calibración de instrumentos de medición en bancos de ensayo**. Revista Internacional Indexada Informacion Tecnologica, ISSN 0716-8756. Vol.9, nº 2, 1998, p 169 –176.

[FLESCH99]

Flesch, C. A., Soares, L. Jr. **Metodologia para Uniformização no Tratamento das Questões Metrológicas em Sistemas de Garantia da Qualidade**. COBEM, anais, UNICAMP, 1999.

[For95]

Ford, GM, Chrysler, **QS9000 – Manual of Measurement Systems Analysis**, Automotive Industry Action Group, Detroit Michigan, 1995.

[For95a]

Ford, GM, Chrysler, QS9000 – Manual of Statistical Process Control, Automotive Industry Action Group, Detroit Michigan, 1995.

[França93]

França, L. R. G. Sistema de Gerenciamento de Instrumentos de Controle Geométrico: Caracterização e Desenvolvimento de um Protótipo. Dissertação de Mestrado, EMC - UFSC, 1993.

[Hradesky89]

Hradesky, J. L. Aperfeiçoamento da Qualidade e da Produtividade: guia prático para implementação do CEP: controle estatístico de processo/ John L. Hradesky; tradução Maria Cláudia de Oliveira Santos; revisão técnica José Carlos de Castro Waeny, São Paulo: MacGraw Hill, 1989.

[INMETRO95]

INMETRO. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, Portaria nº 29, de 10 de março de 1995, Duque de Caxias - RJ, Brasil.

[ISO 14253-1:1996]

ISO 14253-1:1996, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messungen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nicht-Übereinstimmung mit der Spezifikation.

[ISO/TR 14253-2:1996]

ISO/TR 14253-2:1996, Geometrical Product Specification (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring instruments - Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring instruments and product verification, International for Standardization , Geneva, Switzerland, 1996.

[Juran92]

Juran, J. M., Gryna, F. M. Controle da Qualidade: Métodos Estatísticos Clássicos Aplicados à Qualidade (Volume VI). tradução Maria Cláudia de Oliveira Santos, revisão técnica TQS Engenharia, Prof. Gregório Bouer, Prof. Joaquim do Amaral Ferreira, Makron Books, São Paulo, 1992.

[Kessel96]

Kessel, W. Uncertainty of Measurement and Methods of Evaluation in Calibration. Apostila de Curso, Fundação CERTI - Florianópolis, 1996.

[Kornblit97]

Kornblit, F. Evaluation of Uncertainty in Calibration an Testing, Advanced School of Metrology: Evaluation of Uncertainty of Measurement, Programa RH Metrologia, Angra dos Reis, RJ, 1997.

[Levin87]

Levin, J. **Estatística Aplicada a Ciência Humanas**, tradução Sérgio Francisco Costa. São Paulo, Editora Harba Ltda, 2ª edição, 1987.

[Liska97]

Liska, A. F., Donatelli, G. D. **Conformidade com especificação de comprimento considerando o efeito dos erros de forma**, Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade, Florianópolis, Brasil, 1997.

[Lourengo82]

Lourenço Filho, R. C. B. **Controle Estatístico da Qualidade**, Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982.

[Mathiesen97]

Mathiesen, O. **Uncertainty of measurement - understanding the GUM**. Advanced School of Metrology: Evaluation of Uncertainty of Measurement, Programa RH Metrologia, Angra dos Reis, RJ, 1997.

[McCall170]

McCall, R. B. **Fundamental Statistics for Psychology**, New York, Harcourt, Brace & World, INC., 1970.

[MENNO97]

MENNO Equipamentos para Escritório Ltda, Visita à fábrica em Erechim - RS, 1997.

[NAMAS95]

NAMAS Executive. **NIS 3003 - The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations**, National Physical Laboratory, England, 1995.

[NBR 10012:1992]

ISO 10012-1:1992, *Quality assurance requirements for measuring equipment - Part 1: Metrological confirmation system for measuring equipment*, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).

[NBR 10125:1987]

NBR 10125- Relógios comparadores com leitura de 0,001 mm; especificação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

[NBR ISO 9001:1994]

NBR ISO 9001: 1994 - Sistemas da Qualidade - Modelo para garantia da qualidade em projeto, desenvolvimento, produção instalação e serviços, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

[NBR10125:1987]

NBR 10125- "Relógios comparadores com leitura de 0,001 mm; especificação". ABNT, 1987.

[Ross91]

Ross, P. J. **Aplicações das Técnicas de TAGUCHI na Engenharia da Qualidade**; tradução Regina Cláudia Loverri; revisão técnica José Carlos de Castro Waeny, São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

[Sin95]

Singapore Institute of Standards and Industrial Research. **Guidelines on the Evaluation and Expression of the Measurement Uncertainty - SINGLAS Technical Guide 1**, Singapore Laboratory Accreditation Scheme, Singapore, 1995.

[Taylor94]

Taylor, B. N., Kuyatt, C. E **Guías para la Evaluación y Expresión de la Incertidumbre de los Resultados de las Mediciones de NIST**. Spanish Translation of NIST Technical Note 1297. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1994.

[VOLKSWAGEN98]

Volkswagen do Brasil Ltda. Atuação do autor na função de Engenheiro da Qualidade na fábrica em São José dos Pinhais - PR, 1998.

[WECKENMANN98]

Weckenmann, A., Knauer, M. – **Causes and Consequences of Measurement Uncertainty in Production Metrology**. 6th IMEKO SYMPOSIUM, Sep/1998.